

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

«На правах рукопису»
УДК 621.311.1

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«___» грудня 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізації Системи забезпечення споживачів електричною енергією

на тему: «Вибір раціональних місць приєднання установок відновлюваної енергетики (розосередженої генерації) для якісного електрозабезпечення з урахуванням характеристик споживача»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ОЕ-91мп

Іващенко Тарас Сергійович

Науковий керівник: *к.т.н., старший викладач Ярмолюк О.С*

Консультант: нормоконтроль *ас. Прокопенко І.Д*

Рецензент: _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Спеціалізація «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«__» грудня 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Іващенко Тараса Сергійовича

1. Тема дисертації «Вибір раціональних місць приєднання установок відновлюваної енергетики (розосередженої генерації) для якісного електрозабезпечення з урахуванням характеристик споживача»

Науковий керівник дисертації: к.т.н., старший викладач Ярмолюк Олена Сергіївна затверджені наказом по університету від «03» листопада 2020 р. №3199-с.

2. Строк подання студентом дисертації: 21 грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження: вплив встановлених джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії в мережі.

4. Предмет дослідження: вибір раціональних місць приєднання установок розосередженої генерації для якісного електрозабезпечення з урахуванням характеристик споживача.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- провести аналіз можливостей підключення джерел розосередженої генерації до розподільних електричних мереж;
- сформулювати критерії і обмеження для визначення оптимального вирішення задач;
- розглянути можливе покращення роботи енергосистеми за рахунок використання інноваційних методик.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: алгоритми розрахунку і таблиці з результатами розрахунків, презентація – наочні матеріали з

результатами досліджень.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

– Іващенко Т.С. Дослідження модифікацій для сонячних електростанцій. Збірник матеріалів XII науково-технічної конференції ІЕЕ Енергетика. Екологія. Людина. Україна, Київ, 7–8 травня 2020 р. С. 99–104;

– Іващенко Т.С. Визначення оптимальних місць приєднання джерел розосередженої генерації. Збірник матеріалів III науково-технічна конференція магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту. Україна, Київ, 26–27 листопада 2020 р. С. 117–121.

8. Консультанти розділів дисертації:

Нормоконтроль ас. Прокопенко Ірина Дмитрівна

9. Дата видачі завдання: 29 травня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Опрацювання літературного матеріалу по темі магістерської дисертації	01.09.20-10.09.20	
2	Аналіз поточного стану енергетичних систем на території України	01.09.20-18.09.20	
3	Дослідження особливостей впровадження джерел розосередженої генерації	18.09.20-08.10.20	
4	Опрацювання наявних методик розрахунку потужності джерел розосередженої генерації	10.10.20-30.10.20	
5	Розробка власного багатокритеріального показника для подальших розрахунків	08.10.20-27.10.20	
6.	Розробка стартап проєкту	27.10.20-16.11.20	
7.	Оформлення дисертації	16.11.20-24.11.20	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	24.11.20-11.12.20	
9.	Передзахист МД	11.12.20-15.12.20	
10.	Захист дисертації	17.12.20-22.12.20	

Студент

Т.С. Іващенко

Науковий керівник дисертації

О.С. Ярмолук

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг дисертації. Магістерська дисертація викладена на 94 сторінки та складається зі вступу, 4 розділів та висновків. Також в роботі наведено 8 рисунків, 18 таблиць та 59 бібліографічних посилань.

Актуальність теми. У зв'язку з швидким розвитком електроенергетики у світі та в Україні в цілому, все більш широкого використання набуває використання розосередженої генерації. Використання таких джерел дає можливість забезпечити нормальне функціонування мережі, безперебійне й якісне електропостачання споживачів. Разом з цим з'являються проблеми пов'язані з ефективністю використання таких електростанцій, через сезонність їх роботи та повну залежність від погодних умов. У магістерській дисертації представлено математичну модель, яка дасть змогу здійснити вибір місця розташування та потужності електростанцій у залежності від характеристик кінцевого споживача.

Метою дисертації є: визначення раціональних місць приєднання установок відновлюваної енергетики для якісного електрозабезпечення споживачів з урахуванням їх характеристик.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі наукові задачі:

- 1) Розглянути загальні відомості про підключення джерел розосередженої генерації до розподільних електричних мереж. Виконати аналіз переваг, недоліків, можливих перспектив і загроз при використанні таких джерел.
- 2) Формування критеріїв і обмежень для визначення оптимального вирішення задачі.
- 3) Розглянути можливе покращення роботи енергосистеми за рахунок використання інноваційних методик.

Об’єктом магістерської дисертації вплив встановлених джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії в мережі.

Предметом дослідження є вибір раціональних місць приєднання установок розосередженої генерації для якісного електрозабезпечення з урахуванням характеристик споживача.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у магістерській дисертації було застосовано багатокритеріальний метод дослідження, який дав можливість, враховуючи характеристики мережі, визначити найбільш оптимальне місце для розташування джерела розосередженої генерації.

Практична та наукова цінність полягає у створенні універсальної математичної моделі, яка дасть змогу оперативно та з великою ефективністю здійснити розрахунок необхідної конфігурації майбутньої електростанції. При вирішенні цієї задачі було вибрано чотири основних критерії, які включали у себе економічні та технічні особливості мережі, що розглядалась. Перелік даних критеріїв можна розширити в залежності від умов проектування.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень по магістерській дисертації було оприлюднено на :

- XII науково-технічній конференції ІЕЕ *Енергетика. Екологія. Людина*, м. Київ, 7–8 травня 2020 р.
- III науково-технічній конференції *магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту*, м. Київ, 26–27 листопада 2020 р.

Публікації. За результатами досліджень було опубліковано такі роботи:

- Іващенко Т.С. Дослідження модифікацій для сонячних електростанцій. Збірник матеріалів XII науково-технічної конференції ІЕЕ *Енергетика. Екологія. Людина*. Україна, Київ, 7–8 травня 2020 р. С. 99–104;
- Іващенко Т.С. Визначення оптимальних місць приєднання джерел розосередженої генерації. Збірник матеріалів III науково-технічна конференція

магістрантів Інституту енергозбереження та енергоменеджменту. Україна, Київ, 26–27 листопада 2020 р. С. 117–121.

Ключові слова: РОЗОСЕРЕДЖЕНА ГЕНЕРАЦІЯ, ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК, РОЗПОДІЛЬНА МЕРЕЖА.

ABSTRACT

The structure and scope of the dissertation. The master's dissertation is presented on 94 pages and consists of an introduction, 4 chapters and conclusions. The paper also contains 8 figures, 18 tables and 59 bibliographic references.

Relevance of the topic. Due to the rapid development of electricity in the world and in Ukraine as a whole, the use of distributed generation is becoming more widespread. The use of such sources makes it possible to ensure the normal functioning of the network, uninterrupted and high-quality power supply to consumers. At the same time, there are problems associated with the efficiency of such power plants, due to the seasonality of their operation and complete dependence on weather conditions. The master's dissertation presents a mathematical model that will allow you to choose the location and capacity of power plants depending on the characteristics of the end user.

The purpose of the dissertation is: to determine the rational places of connection of renewable energy plants for quality power supply to consumers, taking into account their characteristics.

To achieve this goal, the following scientific tasks were set:

- 1) To consider the general information on connection of sources of the dispersed generation to distributive electric networks. Perform an analysis of the advantages, disadvantages, possible prospects and threats when using such sources.
- 2) Formation of criteria and constraints to determine the optimal solution to the problem.
- 3) Consider the possible improvement of the power system through the use of innovative techniques.

The object of the master's dissertation is the influence of the established sources of distributed generation on the quality of electric energy in the network.

The subject of research is the choice of rational places of connection of dispersed generation units for high-quality power supply taking into account the characteristics of the consumer.

Research methods. To solve the problems in the master's dissertation, a multi-criteria research method was used, which made it possible, taking into account the characteristics of the network, to determine the most optimal location for the source of distributed generation.

The practical and scientific value lies in the creation of a universal mathematical model that will allow you to quickly and efficiently calculate the required configuration of the future power plant. In solving this problem, four main criteria were selected, which included the economic and technical features of the network under consideration. The list of these criteria can be expanded depending on the design conditions.

Approbation of dissertation results. The results of research on the master's dissertation were published:

- XII scientific and technical conference IEE "Energy. Ecology. Man ", Kyiv, May 7-8, 2020.
- III scientific and technical conference of undergraduates of the Institute of Energy Conservation and Energy Management, Kyiv, November 26-27, 2020. Publications.

Publications. According to the results of research, the following works were published:

- Ivashchenko Taras Study of modifications for solar power plants. Proceedings of the XII scientific and technical conference IEE Energy. Ecology. Man. Ukraine, Kyiv, May 7-8, 2020, pp. 99–104;
- Ivashchenko Taras Determining the optimal connection points of sources of dispersed generation. Proceedings of the III Scientific and Technical Conference of Undergraduates Institute of Energy Conservation and Energy Management. Ukraine,

Kyiv, November 26-27, 2020

Key words: DISPERSED GENERATION, RENEWABLE ENERGY, OPTIMIZATION, ELECTRICITY QUALITY INDICATORS, MULTICRITERIAL INDICATOR, DISTRIBUTION NETWORK.

ЗМІСТ

ВСТУП	12
1 ПРИЄДНАННЯ УСТАНОВОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ).....	14
1.1 Загальні поняття джерел розосередженої генерації	14
1.2 Джерела відновлюваної електроенергетики у якості джерел розосередженої генерації.....	16
1.3 Перспективи розвитку розосередженої генерації України в порівнянні з країнами світу	18
1.4 Огляд проблеми встановлення джерел розосередженої генерації.....	27
Висновки до розділу 1.....	30
2 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ВПЛИВ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	32
2.1 Показники якості електроенергії	32
2.1.1 Основні показники якості електроенергії	32
2.1.2 Допоміжні показники якості електроенергії.....	33
2.1.3 Принципи нормування показників якості.....	34
2.2 Розрахунок показників якості електроенергії	34
2.2.1 Відхилення частоти	34
2.2.2 Відхилення значень напруги	35
2.2.3 Коливання напруги та доза Флікера.....	36
2.2.4 Втрати потужності в електричній мережі	37
2.2.5 Несинусоїдальність напруги.....	38
2.3 Вплив впровадження джерел розосередженої генерації на показники якості електричної енергії	38
2.3.1 Вплив розосередженої генерації на характеристики напруги	40
2.3.2 Вплив джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії	42

2.4 Проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії в загальну мережу	44
2.4.1 Вітрові електричні станції.....	44
2.4.2 Сонячні електричні станції.....	46
2.4.3 Напрями використання відновлюваних джерел енергії	47
Висновки до розділу 2.....	49
3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....	50
3.1 Вплив відновлюваних джерел енергії на розподільні електричні мережі	50
3.2 Формування системи критеріїв і обмежень, які оцінюють різні варіанти вирішення задачі оптимального підключення відновлюваних джерел енергії	57
3.3 Постановка задачі та формування відповідної цільової функції	61
3.3 Результати розрахунково-модельних випробувань.....	67
Висновки до розділу 3.....	77
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	78
4.1 Опис ідеї проєкту	78
4.2 Технологічний аудит проєкту	79
4.3 Аналіз стану ринку для запуску стартап-проєкту.....	80
4.4 Розробка ринкової стратегії	82
4.5 Розробка маркетингової програми розвитку стартап-проєкту	83
Висновки до розділу 4.....	84
ВИСНОВКИ.....	86
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. У зв'язку зі швидким розвитком електроенергетики у світі та в Україні в цілому, все більш широкого використання набуває використання розосередженої генерації. Використання таких джерел дає можливість забезпечити нормальне функціонування мережі, безперебійне й якісне електропостачання споживачів. Разом із цим з'являються проблеми пов'язані з ефективністю використання таких електростанцій, через сезонність їх роботи та повну залежність від погодних умов. У магістерській дисертації представлено математичну модель, яка дасть змогу здійснити вибір місця розташування та потужності електростанцій у залежності від характеристик кінцевого споживача.

Метою дисертації є: визначення раціональних місць приєднання установок відновлюваної енергетики для якісного електрозабезпечення споживачів з урахуванням їх характеристик.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі наукові задачі:

- 1) Розглянути загальні відомості про підключення джерел розосередженої генерації до розподільних електричних мереж. Виконати аналіз переваг, недоліків, можливих перспектив і загроз при використанні таких джерел.
- 2) Формування критеріїв і обмежень для визначення оптимального вирішення задачі.
- 3) Розглянути можливе покращення роботи енергосистеми за рахунок використання інноваційних методик.

Об'єктом магістерської дисертації вплив встановлених джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії в мережі.

Предметом дослідження є вибір раціональних місць приєднання установок розосередженої генерації для якісного електрозабезпечення з урахуванням характеристик споживача.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у магістерській дисертації було застосовано багатокритеріальний метод дослідження, який дав можливість, враховуючи характеристики мережі, визначити найбільш оптимальне місце для розташування джерела розосередженої генерації.

Практична та наукова цінність полягає у створенні універсальної математичної моделі, яка дасть змогу оперативно та з великою ефективністю здійснити розрахунок необхідної конфігурації майбутньої електростанції. При вирішенні цієї задачі було вибрано чотири основних критерії, які включали у себе економічні та технічні особливості мережі, що розглядалась. Перелік даних критеріїв можна розширити в залежності від умов проєктування.

1 ПРИЄДНАННЯ УСТАНОВОК ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ)

1.1 Загальні поняття джерел розосередженої генерації

Світова електроенергетика постійно розвивалася одним шляхом: відбувалась централізація генеруючих систем, що приводило до створення все більш потужного енергетичного обладнання та подальшого його об'єднання в окремі енергетичні комплекси. За рахунок цього було створено великі світові енергетичні системи: «*ENTSO-E*» (Європейська мережа операторів системи передачі електроенергії), «ОЕС» (Об'єднана енергетична система України), «ЄЕС» (Єдина енергетична система Росії) та інші.

Останні роки в світі спостерігається чітка тенденція змін загальної концепції розвитку електроенергетики. Тобто відбувається започаткування нової ідеології енергетики сталого розвитку [1]. Основним елементом цієї ідеології є встановлення джерел розосередженої генерації – це установки невеликої потужності. Це стало можливим лише після появи газотурбінних і парогазових установок з високою ефективністю [2], а також стрімким розвитком відновлюваних джерел енергії.

На даний можна знайти багато синонімічних термінів та визначень поняття розосереджена генерація, які часто протирічать або дублюють одне. Наприклад, в Північній Америці застосовують термін «*dispersed generation*», який має дослівний переклад як «розпорошена генерація», а в країнах Західної Європи та Азії часто зустрічається термін «децентралізована генерація» [3]. У той час деякі автори [5] розосередженою генерацією називають невеликі джерела електричної енергії, які не входять до енергосистеми, але в той час знаходяться безпосередньо близько до споживачів. Інше, більш конкретне визначення [6], – це невеликі електростанції (цикл яких може складатися як зі спалювання палива, так і з

інших), що розташовані не далеко від кінцевого споживача електричної енергії. Більш чітке поняття розосереджена генерація сформульоване в [3] – це джерела електричної енергії, які з'єднано з розподільною електричною мережею або підключено до мережі зі сторони споживача. Тип цих об'єктів залежить від специфіки місця приєднання.

Міжнародні організації приділяють багато уваги до можливих проблем такої генерації та беруть активну участь в їх вирішенні. [11]. Відома французька робоча група «*CIGRE*» (*Conseil International Des Grands RESEAUX Électriques*) [8] під розосередженою генерацією розуміє генеруючі пристрої, які найчастіше з'єднані з розподільною мережею й їх максимальна потужність становить від 50 МВт до 100 МВт. У відомих на весь світ стандартах «*IEEE*» [9] під цим поняттям розглядають генеруючі установки, які значно менші за потужністю, у порівнянні з централізованими електричними станціями, та вони можуть бути приєднані до будь-якого вузла системи, який знаходиться неподалік. *International Energy Agency* [11] у свою чергу не встановлює вимог до потужності встановлених генеруючих пристроїв, але відносять до них лише ті, що виробляють енергію на стороні споживача та поставляють її безпосередньо в об'єднану електричну мережу.

Також у різних країнах є різниця у визначення потужності джерел розосередженої генерації [12]. У шведському законодавстві прописано, що це енергоблоки до 1500 кВт, тоді як на енергетичних ринках Англії такими вважають електростанції з потужністю менше 100 МВт, що працюють без централізованого диспетчерського керування.

Оскільки є багато варіантів визначень поняття розосередженої генерації та деякі експерти за основну оцінку беруть розташування відносно основної енергосистеми та кінцевих споживачів, а інші – встановлену максимальну потужність станції. Тому, враховуючи всю вище наведену інформацію, пропонується у подальшому під розосередженою генерацією розуміти такі

джерела, які з'єднано або підключено з розподільною мережею зі сторони електроспоживачів [10].

1.2 Джерела відновлюваної електроенергетики у якості джерел розосередженої генерації

Зважаючи на ситуацію, яка склалась у багатьох країнах світу, де відбувається постійний ріст попиту на електроенергію, було прийнято рішення задовольняти його завдяки підключенню до електричних мереж розосередженої генерації, а найчастіше це джерел відновлюваної енергетики.

Актуальність впровадження таких елементів обумовлена значними екологічними, технічними та економічними перевагами їх над об'єктами «традиційної» енергетики. Найголовніше – це вагоме зниження капітальних витрат на розробку та будівництво електростанцій, зменшення собівартості вироблення електричної та теплової енергії, що досягається за рахунок зниження втрат, значне підвищення показників якості електрики та надійності електропостачання [13]. Встановлення джерел відновлюваної електроенергетики дає можливість враховувати індивідуальні потреби споживачів, а також забезпечити екологічно чисте виробництво.

Основна генерація відновлюваними джерелами електроенергії на кінець 2019 року становила [15]:

1. Гідроенергетика з часткою 1310,9 ГВт.
2. Вітроенергетика з часткою 622,7 ГВт.
3. Сонячна енергетика склала 586,4 ГВт.

Але поруч з усіма відомими перевагами використання таких джерел розосередженої генерації, виникає ціла низка проблем [16], вирішення яких у першу чергу пов'язано з необхідністю вибору раціональних місць підключення

джерел до електричних мереж. Якщо таке джерело підключити в неоптимальному місці або/та з неоптимальною потужністю, режимні параметри мережі можуть погіршуватися у рази.

Основна залежність відновлюваної енергетики – це наявність первинних ресурсів: вітер, сонце або вода. Але це не найбільша проблема, яка може постати під час проєктування такої електростанції. Існує безліч ситуацій, коли нехтування або неврахування особливостей конкретної мережі або її технічного стану може привести до значного зростання втрат електричної енергії, або навіть буде заважати нормальному функціонуванню й обслуговуванню електричної мережі. Це у свою чергу призведе до значних капіталовкладень на модернізацію та покращення стану мережі, що позначиться на терміні окупності проєкту. Найчастіше у таких випадках поруч можна знайти інші ділянки, які є більш підходящими для приєднання джерел розосередженої генерації [14].

На сьогоднішній день розробники з різних країн займаються вирішенням проблеми раціонального приєднання джерел розосередженої генерації. І не заважаючи на те, що проведено велика кількість досліджень і публікацій, створено безліч математичних моделей, проблема оптимального приєднання та розміщення не є повністю вирішеною [16, 18].

Зважаючи на стан електричних мереж на території України, який з кожним роком ще більше погіршується, а системний оператор і власник розподільних мереж намагаються «перекласти» модернізацію та розвиток мережі на плечі інвесторів, тому ця проблема стає вкрай актуальною на даний момент. Отже, для вирішення задачі оптимізації місць встановлення та величини потужності розосередженої генерації є актуальним розробка нових математичних моделей і методик. Це в свою чергу призведе до ефективного, а найголовніше безпечного збільшення обсягів відновлюваної енергетики в об'єднаній енергетичній системі України.

1.3 Перспективи розвитку розосередженої генерації України в порівнянні з країнами світу

На сьогоднішній день електроенергетика світу, а в тому числі й України переживає кардинальні зміни, основним стимулом чого стали технологічні інновації, які дають можливість перейти до принципово нових етапів розвитку.

У розрізі останніх років всі зміни, що відбулися в цьому сегменті, змусили переглянути вимоги до всіх об'єктів генерації, стану мереж і запровадити принципово нову організацію в електроенергетиці й електроенергетичних ринків [19].

Значне зношення електроенергетичного комплексу, поява великої кількості розосередженої генерації (у тому числі і відновлюваної), старіння традиційних джерел енергії, значний ріст попиту на електрику й енергоносії, а найголовніше зміна поведінки споживачів і регуляторів призвела до того, що з'явилась необхідність вивчення нових технологій і перехід до принципово нових правил електроенергетичного укладу.

У світі з'явилась та вдало функціонує тенденція поступової відмови від централізованого електропостачання. На даний момент вже 12,5 % великих виробників зі світовим іменем користуються власними генеруючими джерелами. Найкращим прикладом є Данія, де понад половина виробництва користується особистими джерелами генерації [20].

Така тенденція проглядається і в Україні, де великі споживачі один за одним відмовляються від споживання електроенергії, яка приходить до них з об'єднаної енергосистеми та намагаються встановлювати власну розосереджену генерацію. Концепція розосередженого генерування – це розвиток енергетики, який передбачає будівництво споживачами генеруючих джерел невеликої потужності та розмірів або мобільної конструкції з необхідними розподільними мережами, що будуть виробляти електричну та/або теплову енергії для власного

споживання, а всі надлишки передавати у загальну мережу (теплову або електроенергетичну) [21].

Така концепція передбачає проєктування та будівництво нових додаткових джерел енергії поряд зі споживачем. На потужність таких станцій може впливати очікувана потужність споживання та певні обмеження, у залежності від умов (екологічні, правові, технічні та т.д.). Потужність таких станцій може варіюватися від декількох кВт до кількох сотень кВт. Але при цьому сам споживач залишається підключеним до загальної мережі електропостачання [22].

Але за таких умов можливі певні проблеми зв'язані з дисбалансом виробництва та споживання енергії або між потребою в її використанні. Це може виникнути через:

1. У зимовий період року споживання теплової енергії є постійним, тоді як електроспоживання змінюється з часом доби (завжди після 17:00 спостерігаються піки).
2. Генерація сонячних і вітрових електростанцій постійно змінюється в залежності від погодних умов, тоді як споживання змінюється в іншу сторону.

Це приводить до висновку, що підключення до загальної електричної мережі дає змогу компенсувати нестачу електроенергії завдяки споживанню її від централізованого джерела, а в разі надлишку – на вигідних засадах продавати її в ту ж мережу. Дана концепція дає можливість вирішити ряд проблем:

- відбудеться зниження втрат електричної енергії при передаванні через максимальне наближення джерела розосередженої генерації безпосередньо до споживача;
- зменшення наслідків аварійних ситуацій на центральних підстанціях та лініях електропередачі;
- зменшення впливу на екологічний стан, за рахунок використання «зелених» електростанцій;

- скорочення кількості, протяжності та пропускної здатності ліній електропередачі;
- керування попитом на електроенергію [23].

Нажаль, у даний момент повна відмова від класичних потужних центральних електростанцій і децентралізація виробництва неможлива як з економічних міркувань, так і в зв'язку складного керування великою кількістю таких об'єктів, їх технічного обслуговування, а також необхідністю повного балансу генерації та споживання в системі, тобто необхідність присутності резервної потужності.

З іншого боку будуть страждати споживачі, які підключено зі сторони низького рівня напруги, адже буде значне зростання цін на електричну енергію.

У той час, фокусування генерації енергії завдяки викопних джерел (повна залежність від вугілля) призводить до того, що з підвищенням розвитку країни, та у тому числі споживання електроенергії, збільшуються викиди парникових газів. Використання такої стратегії розвитку може негативно позначитись на майбутній повній європейській інтеграції України, адже там є чіткі пункти щодо захисту клімату та зменшення викидів, у тому числі і від електроенергетики [17]. Такі умови будуть створювати економічні стимули для ефективного використання енергії та покращення умов для подальшого розвитку відновлюваної енергетики. Однією з особливостей України є дуже прямий зв'язок між державними органами та приватним капіталом. Це полегшує реалізацію великих національних проєктів у цьому сегменті, адже все здійснюється за принципом «*top-down*» («зверху-вниз») [24]. Але з іншого боку це знижує довіру іноземних інвесторів і гальмує активне залучення середніх підприємств для розвитку. Німеччина своїм досвідом показує, що сектор генерації відновлюваними джерелами тримається на приватних компаніях, найчастіше на середніх виробничих підприємствах [22].

За останні роки розвитку України та у цілому суспільства, велика увага почала приділятися проблемі екології, у тому числі і використанню відновлюваних джерел енергії, що мають мінімальний шкідливий вплив. Не зважаючи на досить низький рівень розвитку цієї галузі, держава створює нові та нові методи для заохочення, серед яких є і закон про «зелений тариф». Даний закон, аналогічний німецькому про відновлювану енергетику, до 2035 року буде економічно стимулювати виробництво «зеленої енергії».

Розвиток цього сектору в Україні дасть змогу покращити інвестиційний клімат сегменту та підвищити економічне становище, але для цього потрібно провести низку політичних та економічних змін. На даний момент можна запропонувати такі рекомендації щодо ефективного з точки зору економіки використання в Україні потенціалу відновлюваної генерації, не залежно від того, чи проєктується, чи вже існує цей елемент.

По-перше, необхідно, щоб були повністю сформульовані чіткі цілі щодо використанню джерел розосередженої генерації та шлях їх подальшого розвитку, що дало б можливість у майбутньому стати інтегральною складовою національної енергетичної стратегії. Лише при довгостроковому плануванні встановлення потужностей для задоволення зростаючого попиту на електроенергію та тепло, заснованого на реальних прогнозах споживання, можна забезпечити економічно та технічно ефективне постачання енергії. Для цього необхідно розрахунковим шляхом визначити економічний і технічний потенціали окремих видів генерації. Сформувати позитивний клімат у суспільстві по відношенню до відновлюваної енергетики, що забезпечить нормальну реакцію на підвищення цін на електроенергію, генеровану на таких станціях. У свою чергу поступове підвищення цін на електрику та тепло призведе до ефективного споживання та зменшення навантаження на енергетичну систему, що в свою чергу приведе до зменшення кількості інвестицій у генеруючий сектор.

По-друге, необхідно вирішувати проблему бар'єру фінансування, що сталась через значні відсотки при кредитуванні у середині держави. На даний момент потрібно фінансування, хоча б у короткостроковій перспективі, екологічних і кліматозахисних проєктів за рахунок національного капіталу. Такий підхід дав би змогу швидкому проникненню на український ринок відновлюваних джерел енергії.

По-третє, найближчим часом необхідно скоротити кількість діючих регуляторних норм і ефективно упорядкувати всю систему адміністрації у сфері енергетичної політики, спростити та зробити більш прозоре ліцензування. Дане рішення дасть можливість залучати потенційних іноземних інвесторів завдяки полегшенню входу їх капіталу в цей сегмент бізнесу.

Також до розосередженої генерації відноситься не тільки генерація, а й всі системи розосередженого зберігання, заходи по покращенню енергоефективності підприємств і споживачів, програми щодо зниження споживаної енергії, мікрогріди та на даний час також ще широкого попиту набирає електротранспорт. На сьогоднішній день у США значну частину розосереджених енергоресурсів складає ефективне зниження споживання та заходи стосовно покращення енергоефективності [22].

Відома світова компанія «ConEdison» змогла заощадити 1 млрд доларів інвестиційних коштів, що мали б бути використані на розширення мережевої інфраструктури кількох районів Нью-Йорка. Це було досягнуто за рахунок запуску масштабної компанії щодо зниження навантаження у пікові періоди на 52 МВт, реалізація даного проєкту обійшлась в 200 млн доларів. Для вирішення поставлених задач було проведено ряд аукціонів і виконано різні заходи щодо підвищення енергоефективності – починаючи від заміни ламп на більш ефективні до встановлення накопичувачів електроенергії власне у самих споживачів і організація керування цим обладнанням [19]. Тому можна зробити висновок, що тільки ініціативи енергокомпаній дадуть можливість знизити

споживання у години найбільшого попиту на 5–6 % або на кілька десятків ГВт, а це в свою чергу дасть змогу скоротити необхідність в додаткових блоках генерації та у цілому збільшенню мережевої інфраструктури.

У більш спрощеному розумінні розосереджене генерація – це будівництво й експлуатація споживачами джерел електричної та теплової енергій для особистих потреб, а надлишки яких продаються та направляються у загальну мережу.

До об'єктів такої генерації відносять джерела з малою потужністю, яка може складати до 25 МВт [25]. Також значного поширення набули об'єкти когенерації, де відбувається одночасне виробництво електричної та теплової енергій. І не потрібно забувати про відновлювані електростанції. Тому, на даний момент можна зазначити, що об'єкти малої енергетики – це станції потужністю до 25 МВт, мікроенергетика – джерела до 1 МВт

Отже, можна зробити висновок, що розосереджена генерація – це виробництво електричної енергії поряд або на місці її споживання окремими споживачами, яка використовується для власних потреб, а надлишки направляються у загальну мережу споживання.

До таких об'єктів можна віднести:

- блок-станції – джерела електричної або теплової енергій, які розташовані на території або поряд з промисловим виробництвом та належать власникам цього підприємства або взяті в оренду в іншого власника. Даний вид станції є досить вигідним, адже вони можуть працювати завдяки побічним продуктам основного виробництва (як приклад доменний газ);

- теплоелектроцентралі – об'єкти когенерації. Такі станції дають можливість підвищити коефіцієнт використання палива (у середньому на 30 %). Завдяки цьому значні витрати та складність спорудження й подальшої експлуатації тепломереж стає менш впливовим фактором при виборі цього

варіанту. На сьогоднішній день в країнах Західної Європи широко поширюється та підтримується методика когенерації [19].

Джерела розосередженої генерації має ряд суттєвих переваг, серед яких – показники якості, надійності та загальної вартості електроенергії у порівнянні зі споживанням із загальної мережі. Останні у свою чергу залишаються запасним (резервним) варіантом.

Розосередженість джерел генерації також є одним із важливим факторів у підвищенні енергетичної безпеки країни, оскільки це дасть змогу знизити ризики та більш оперативно відновлювати електропостачання споживачів після надзвичайних ситуацій (пошкоджень мережі, кібератак або природних лих).

Швидкий розвиток виробництв і збільшення сфер застосування розосередженої генерації призвело до того, що відбулося покращення технологій керування обладнанням і його сервісним обслуговуванням. Це у свою чергу забезпечило максимальне використання їх потенціалу, нормальне функціонування в енергосистемі та покращило місце на енергетичному ринку, що у подальшому створить хороші технологічні умови для появи масових активних споживачів.

Основні переваги розосередженої генерації в тому числі та відновлюваних джерел спостерігаються в таких сферах:

- економіка – прикладом може бути обмеження зростання цін на електрику за рахунок зменшення плати за використання розподільних мереж при передачі електроенергії;
- керування – швидкий розвиток нових і вдосконалення існуючих технологій керування попитом на споживання, а також покращення технічного обладнання та сервісу в електропередавальних компаніях за рахунок наявності конкуренції;

– екологія – найголовніший вплив даного способу генерації, адже зменшується кількість викидів парникових газів і допоможе запобігти змінам клімату.

Компанії зможуть використовувати розосереджену генерацію лише тоді, коли будуть повністю усвідомлювати всі плюси їх використання, а також всі можливі проблеми в їх впровадженні. У таблиці 1.1 відображено декілька бар'єрів, які можуть вплинути на розвиток і впровадження розосередженої генерації.

Таблиця 1.1 – Бар'єри розвитку розосередженої генерації [19]

Домінування традиційної моделі організації галузі	Рішення в області енергетики засновані на моделі централізованого виробництва електроенергії з використанням мережі передачі та розподілу для поставки електроенергії споживачам
	Інституційна структура, правила та норми, вимоги до монтажу та технічні стандарти створюють більш сприятливі умови для централізованого виробництва електроенергії, ніж для розосередженої генерації
	Історично витрати на електроенергію були значно меншими в порівнянні з іншими витратами, ніж в даний час, розвиток альтернативних джерел не отримувало стимулу
	Проблеми навколишнього середовища надали імпульс розвитку генеруючих об'єктів різної потужності на основі відновлюваних джерел електроенергії, проте не забезпечили створення фінансових стимулів

Продовження таблиці 1.1.

Визначення потенційних можливостей розосередженої генерації	Інформація про можливості використання альтернативних джерел енергії обмежено доступна для побутових споживачів
	Норми та рекомендації процедури сертифікації постачальників не узгоджені, й їх реалізація утруднена
	Проблеми, пов'язані з нормами регулювання, технічними аспектами і потужністю
	Підключення розосередженої генерації викликає складності, незважаючи на наявність норм регулювання
	Мікроустановки розосередженої генерації потребують високих витрат на монтаж
Рентабельність розосередженої генерації	Отримання дозволів на використання ресурсів і будівництво систем розосередженої генерації вимагає значних витрат часу і коштів, для об'єктів малої генерації вимоги істотно завищені
	Вартість електроенергії від установок розосередженої генерації може бути більш високою в порівнянні з цінами на електроенергію, що поставляється з мережі
	Застосування нової технології може бути пов'язано з додатковими витратами та ризиком
	Енергозбутових компанії рідко готові купувати надлишкову електроенергію, вироблену мікроустановками розосередженої генерації
	Термін окупності систем розосередженої генерації занадто великий для побутових споживачів
Отримання інвестицій в розподільні мережі	Розподільні компанії можуть не мати достатніх стимулів для інвестування на підтримку розосередженої генерації

До характеристик, які впливають на ефективність запровадження технологій розосередженої генерації, також відноситься: надійність, швидкість,

задоволення від експлуатації, контроль процесу роботи станцій, ризики пов'язані з функціонуванням та експлуатуванням [26].

1.4 Огляд проблеми встановлення джерел розосередженої генерації

У реаліях сучасного світу та швидкого розвитку розосередженої генерації, у тому числі та відновлюваної енергетики, гостро постало питання їх впливу на загальну систему електропостачання та найбільш ефективних місць розташування з точки зору вигоди як технічної так і економічної. Протягом останніх десяти років дослідники з різних країн розробляли математичні та технічні моделі для покращення ефективності функціонування та розміщення таких систем.

У [31] досліджувалися зміни властивостей енергосистеми при інтеграції джерел розосередженої генерації у нормальних і аварійних режимах роботи. Автор даної публікації визначив ряд проблем, які виникали при використанні таких джерел.

Як приклад було взяти вітроенергетичні установки, де використовуються асинхронні двигуни, які є споживачами реактивної потужності та мають пульсуючий нерівномірний графік генерації. Таким чином, слід передбачити, що споживачі, які використовують енергію вітру, повинні мати резервні потужності у розмірі до 50 % від потужності встановленої станції. Крім того, відбувається зміна співвідношення активної та реактивної потужностей у загальній мережі. Установка ємнісної компенсації реактивної потужності змінює частотні характеристики енергосистеми та склад вищих гармонік. Таким чином, після відновлення з'єднання джерела розосередженої генерації, яке працювало автономно, з основною енергосистемою, змінюється частотна характеристика енергосистеми та виникають певні перехідні процеси. Такі збурення в

енергосистемі можуть призвести до помилкової роботи пристроїв релейного захисту основної енергосистеми, ускладнення процесу керування енергосистемою, зменшення її стійкості [32]. Безпосередньо у споживача таке збудження у загальній системі електропостачання відображується на показниках якості напруги, а також зменшує надійність постачання електричної енергії.

Швидкі коливання вихідної потужності вітрових електростанцій призводить до появи шкідливого ефекту «флікера». Значення флікера залежить від параметрів енергосистеми – потужності короткого замикання, кута внутрішнього імпедансу [32]. Сонячні установки працюють лише вдень, мають пульсуючий нерівномірний режим генерації [33]. Їх інвертори генерують в електромережу вищі гармоніки.

У самих установках розосередженої генерації, приєднаних до енергосистеми, мають місце проблеми, що пов'язані з забезпеченням стійкості та надійності роботи, що потребує встановлення додаткової апаратури автоматики. Певною мірою на стійкість роботи установки розосередженої генерації впливає режим роботи навантаження та співвідношення між потужністю, що споживається навантаженням, та потужністю, яка передається в енергосистему. Мається на увазі, в першу чергу, особливості роботи асинхронних двигунів [34, 35].

Всі перераховані збурення в енергосистемі пов'язані з таким параметром, як «потужність короткого замикання енергосистеми» (*short-circuit capacity*). Для його оцінки пропонується використовувати параметр «внутрішній імпеданс енергосистеми» [36]. Даний параметр на пряму залежить від потужності короткого замикання трансформаторів і генераторів, які приєднано до системи електропостачання, загальної довжини ліній, потужності приєднаної станції розосередженої генерації, а також від кількості встановлених компенсаторів реактивної енергії. Найчастіше значення такого показника нормується для кожного конкретного джерела розосередженої генерації.

Для вирішення задач оптимального встановлення та необхідної потужності розосередженої генерації було розроблено різні методи оптимізації, які мають свої переваги та недоліки.

Широкого застосування набув аналітичний безітераційний метод. Суть якого полягає у визначенні екстремум цільової функції завдяки виконанню математичних перетворень розрахункових формул. Які у свою чергу характеризують параметри усталеного режиму через потужність генерації на кожній із шин електричної мережі. Після ряду таких перетворень отримується результуюча формула, яка визначає оптимальне значення потужності станцій розосередженої генерації для конкретної шини електромережі. Основною перевагою такого методу на відміну від ітераційного – це відсутність проблеми збіжності розв’язання. До недоліків можна віднести складність формування формул і прийняття за ідеал припущень необхідних для спрощення подальшого розрахунку та перетворення формул. Використання таких припущень може привести до хибного розв’язання задачі при застосуванні аналітичних методів до реальних енергосистем [37].

Також для розв’язання поставлених задач часто використовується метод перебору варіантів [37]. При цьому здійснюється перебір усіх можливих варіантів розміщення та потужності джерел розосередженої генерації в загальній електричній мережі. Однією з проблем такого методу є величезна кількість обчислень, які необхідно виконати. Певним розширенням методу повного перебору усіх можливих варіантів є використання індексів чутливості. При застосуванні методу чутливості здійснюється перебір лише частини можливих варіантів. У цьому методі для кожної шини загальної мережі, де теоретично можливе встановлення джерела розосередженої генерації визначається індекс чутливості, який є значенням похідної від функції втрат потужності до генерованої потужності джерелом у вузлу мережі. На основі індексів чутливості вибирається шина з найбільшим значенням чутливості, до якої підключається

джерело. Так, шляхом перебору варіантів визначається оптимальне значення потужності розосередженої генерації. Простір можливих рішень при такому підході є значно меншим, а отже, і час, необхідний для виконання розрахунків, також значно зменшується. Проте за один етап роботи методу визначаються оптимальне місце встановлення та величина потужності лише для одного джерела генерації [39].

Ще одним із методів, який застосовується для розв'язання задачі раціонального розміщення джерел розосередженої генерації, є метод статистичних випробувань Монте-Карло [40]. Суть його полягає в тому, що створюється модель досліджуваного об'єкта та здійснюються спостереження за процесами, які у ній відбуваються. Ці процеси моделюються шляхом багаторазових випробувань їх випадкових реалізацій відповідно до заданого закону розподілу випадкових величин [41]. До основних переваг даного методу є простий алгоритм реалізації, відсутність збіжності, нечутливість до екстремумів у конкретних точках. Але однією з проблем є те, що точність цього методу прямопропорційна до кількості виконаних обчислень, а ефективність залежить від цільової функції, що використовується, й її адекватності.

Висновки до розділу 1

1. До джерел розосередженої генерації відносяться установки потужність до 25 МВт, які розташовано в безпосередній близькості до споживача та які можуть працювати паралельно з загальною енергосистемою. До таких джерел відносяться об'єкти когенерації, електростанції на основі відновлюваних джерел енергії, дизельні генератори тощо.

2. Впровадження джерел розосередженої генерації дасть можливість вирішити ряд проблем: зменшити втрати при передачі, зменшити наслідки

аварійних ситуацій на підстанціях, підвищити екологічний стан країни, скоротити навантаження загальну передавальну мережу.

3. В останні роки у світі спостерігається тенденція зміни концепції подальшого розвитку електроенергетики. Такий підхід отримав назву – енергетика сталого розвитку. В Україні ця тенденція також прослідковується, адже за останні роки сумарна потужність станцій на основі відновлюваних джерел енергії значно виросла.

2 ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ. ВПЛИВ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Показники якості електроенергії

Постійний і точний контроль якості електроенергії передбачає оцінювання відповідності певних показників встановленим нормам, а подальший аналіз отриманих даних допоможе визначити сторону, яка мала безпосередній вплив на погіршення цих показників. Енергоефективність та безпека споживачів і енергосистеми в цілому залежать від якості електричної енергії в мережі [42].

Показники якості електричної енергії можуть змінюватися через певний ряд причин, серед яких: зміни навантажень, поява електромагнітних завад від специфічних видів обладнання, вплив погодних факторів, зношення електричних мереж тощо. У результаті впливу таких факторів відбувається зміна характеристик у будь-якій точці у будь-який момент часу (найчастіше у віддалених точках споживання).

В Україні наявний документ щодо якості електричної енергії [28], де визначено всі технічно допустимі межі, в яких можуть змінюватися параметри. Перша редакція такого документу була прийнята у 1996 році та мала назву ДСТУ 3466-96, чинності він набув з 1998 року. В 2014 році було прийнято новий стандарт [14], який діє і на даний момент.

2.1.1 Основні показники якості електроенергії

Даний документ [28] встановлює жорсткі норми та показники відхилення якості електричної енергії в загальних мережах електропостачання з використанням змінного трифазного або однофазного струмів та частотою 50 Гц. Вимірювання значень може відбуватися у будь-якій точці мережі та у будь-якого

споживача або приймача. Даний стандарт нараховує 11 основних показників якості електроенергії [28]:

- відхилення частоти (δf);
- усталене відхилення напруги (δU_y);
- розмах зміни напруги (δU_1);
- дозу флікера (мерехтіння або коливання) (P_t);
- коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги (KU);
- коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги (KUn);
- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю (K_2U);
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю (K_0U);
- глибину і тривалість провалу напруги ($\delta U_n, \Delta t_n$);
- імпульсна напруга ($U_{\text{імп}}$);
- коефіцієнт тимчасової перенапруги ($K_{\text{пер}}U$).

2.1.2 Допоміжні показники якості електроенергії

При більш глибоких дослідженнях електричних мереж цей перелік показників може збільшуватися. Тому виділяється ряд додаткових показників якості, серед яких:

- частоту повторення змін напруги $F_{\delta}U_t$;
- інтервал між змінами напруги $\Delta t_i, t_i + 1$;
- глибину провалу напруги δU_n ;
- частота появи провалів напруги F_n ;
- тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди $\Delta t_{\text{імп}} 0,5$;
- тривалість тимчасової перенапруги $\Delta t_{\text{пер}}U$.

2.1.3 Принципи нормування показників якості

На сьогоднішній день виділено два види нормування показників якості електроенергії: нормально та гранично допустимі. Принципи нормування показників показано на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Нормування показників якості електроенергії [21]

2.2 Розрахунок показників якості електроенергії

2.2.1 Відхилення частоти

Даний показник показує різницю між реальним (зчитаним в певній точці) і номінальним значенням частоти змінного струму в загальній системі, який визначається за формулою [28]:

$$\delta f = f - f_{\text{НОМ}},$$

де f – реальне значення частоти змінного струму в загальній мережі, Гц.

Згідно з [28] допустимими нормами відхилення частоти є:

$$\begin{aligned}\delta f_{\text{норм}} &= \pm 0,2 \text{ Гц}, \\ \delta f_{\text{доп}} &= \pm 0,4 \text{ Гц},\end{aligned}$$

де $\delta f_{\text{норм}}$ – нормоване значення можливого відхилення частоти, Гц,

де $\delta f_{\text{доп}}$ – допустиме значення відхилення частоти, Гц.

Значення частоти змінного струму в загальній мережі напряму залежить від швидкості обертання генераторів на електричних станціях. Номінальне значення цього показника в Україні прийнято як і в Європейській енергетичній системі – 50 Гц. Постійна підтримка такого рівня можливе лише завдяки наявності резерву потужності, яке може досить легко та швидко реагувати на зміни в системі. У будь-який момент часу в мережі має забезпечуватися баланс (повна відповідність) між потужністю, яку виробляють генератори, та потужністю, яку споживають приймачі, а також необхідно враховувати втрати при передачі електроенергії. Введення резервних потужностей відбувається по команді оператора та призводить до збільшення споживаних ресурсів на електростанції.

2.2.2 Відхилення значень напруги

Даний показник характеризується усталеним значенням відхилення поточного показника напруги в мережі від номінального. Формула для розрахунку згідно з [28]:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%,$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальне значення напруги в мережі, кВ;

U – реальне значення напруги в загальній мережі, кВ.

Цей показник знімається на виводах приймачів електроенергії і нормується відповідно [27]:

$$\begin{aligned}\delta U_{\text{у.норм}} &= \pm 5\%, \\ \delta U_{\text{у.доп}} &= \pm 10\%,\end{aligned}$$

де $\delta U_{\text{у.норм}}$ – номінальне усталене значення відхилення напруги, кВ.

2.2.3 Коливання напруги та доза Флікера

Одним із основних засобів, які дозволяють вимірювати коливання напруги є прилад флікерметр – визначає показник дози флікера. Згідно [26], доза флікера – це міра сприйнятливості людського ока до дії флікера за певний проміжок часу. Флікерметр дозволяє експериментально визначати це значення.

Значення коливання напруги характеризується рядом значень, серед яких: зміна напруги (δU_i), інтервал між змінами напруги Δt_i , $t_i + 1$, доза флікера (P_i), частота повторення змін значень напруги ($F_\delta U_i$).

Найчастіше коливання напруги з'являються, коли в системі велика кількість споживачів зі швидкозмінними графіками споживання (особливо реактивної потужності). Серед таких споживачів найчастіше зустрічаються: компресори, зварювальні апарати, сталеплавильні печі (дугові) та т.д. При стрибковому підвищенні навантаження, відбувається збільшення втрат напруги у гілках мережі, до яких це навантаження відноситься, що в свою чергу приводить до зменшення значення напруги у кінцевому вузлу. По такому ж принципу відбувається і різне зменшення навантаження.

2.2.4 Втрати потужності в електричній мережі

У сучасному світі, звертаючи увагу на нові економічні обмеження, зменшення кількості енергоресурсів в Україні та світі в цілому, втрати електроенергії в системі перетворилися з простого показника для звітів, у один із найголовніших методів економічної ефективності роботи підприємства у енергетичній галузі.

До об'єктів, де були значні втрати активної та реактивної потужностей, раніше привертали досить мало уваги. Адже основним завданням було забезпечити необхідний рівень якості та надійності електропостачання всіх споживачів. При тому, такі мережі були слабо пристосовані до нормального режиму керування через відсутність мінімальних засобів передачі інформації про параметри та поточний стан систему та режиму її роботи, а також не було ніякої можливості керування ними.

Зниження використання електроенергії та підтримання нормального рівня енергоспоживання, на сьогоднішній день є одним з головних факторів економіки будь-якої світової країни. Втрати електричної енергії при транспортуванні її на великі відстані при деяких умовах можуть сягати 16–20 %. Чим вище даний показник, тим більша вірогідність і зниження якості електроенергії.

Для розрахунку активних та реактивних втрат потужності в електричних мережах використовується формули:

$$\Delta P_{\text{кл}} = 3I_{\text{р}}^2 r_0 L_{\text{кл}},$$

$$\Delta Q_{\text{кл}} = 3I_{\text{р}}^2 x_0 L_{\text{кл}},$$

де 3 – кількість фаз лінії;

$I_{\text{р}}$ – розрахункове значення струму навантаження лінії, А;

r_0, x_0 – погонні опори матеріалу проводу кабельної лінії, Ом/км;

$L_{\text{кл}}$ – довжина кабельної лінії, км.

2.2.5 Несинусоїдальність напруги

Даний показник з'являється через те, що в кривій напруги окрім гармоніки основної частоти, наявні гармоніки вищих частот, які є кратними до основної ($n = 2, 3, 4, \dots$, і т.д.).

Гармоніки найчастіше вивчаються завдяки розкладанню кривої фактичного значення напруги у ряд Фур'є. Основною причиною появою такого ефекту є наявність великої кількості споживачів з нелінійними вольтамперними характеристиками. Основний вплив на несинусоїдальність мають тиристорні перетворювачі електроенергії, які досить часто використовуються в промисловості [43].

Несинусоїдальність напруги характеризується такими факторами [21]:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги.

Значення коефіцієнту спотворення розраховується, як відношення сумарного діючого значення всіх вищих гармонік до діючого значення напруги основної гармоніки, при чому $n \geq 2$ [27]:

$$K_u = \frac{\sqrt{U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} 100.$$

2.3 Вплив впровадження джерел розосередженої генерації на показники якості електричної енергії

З одного боку, впровадження джерел розосередженої генерації приводить до поступового нарощення силових електронних систем, які в свою чергу мають прямий вплив на якість електроенергії в мережі [28]. Причиною таких змін, окрім розосередженої генерації, є генерація в мережу вищих гармонік від потужних нелінійних, несиметричних навантажень у споживачів, що мають різко-змінний

режим роботи. Серед таких навантажень найчастіше зустрічаються сталеплавильні печі, потужні зварювальні апарати, штампувальні та прокатні станки тощо.

Їх різко змінний і повторно-короткочасний режим роботи має прямий вплив на споживання ними активної та реактивної потужностей, що в свою чергу впливає на якість електроенергії в загальній електричній мережі. Коливання напруги, які утворюються під час їх роботи, приводять до модуляції у часі амплітуд і фаз складових стуму як основної, так і вищих гармонік, що були генеровані в мережу [27].

Установка розосередженого джерела енергії або накопичувача на стороні споживача має значний техніко- економічний ефект на мережу, що має позитивні та негативні сторони при застосуванні таких технологій. Для ефективного функціонування системи з такими джерелами необхідно проводити ряд технічних і технологічних заходів. З технічної точки зору, підключення таких генераторів полягає у створенні нового джерела активної та реактивної потужностей, а також подальша зміна роботи і топології уже реорганізованої системи електропостачання.

При паралельній роботі джерел розосередженої генерації з загальною мережею, до уваги беруть як і «зовнішні» аспекти впровадження (вплив на параметри системи загального електропостачання та роботу системи оператора), так і «внутрішні» аспекти (вплив на параметри та зміну характеристик систем внутрішнього електропостачання споживачів).

Мінімізація активних і реактивних втрат відбувається за рахунок розташування джерел розосередженої генерації досить близько до споживачів, що в свою чергу приводить до зменшення перетоків потужності по лініям електропередач, які тягнуться від «традиційних» джерел енергії. Найчастіше такі станції працюють в індуктивному режимі з коефіцієнтом потужності, який складає 0,8–1,0, але при використанні інвертора і синхронного генератора можна

досягти роботи в ємнісному режимі. Такий принцип роботи дає змогу використовувати джерело розосередженої генерації як пристрій компенсації реактивної потужності.

2.3.1 Вплив розосередженої генерації на характеристики напруги

Підключення таких джерел енергії також може мати вплив на характеристики напруги з електричній мережі. Це безпосередньо пов'язано як з конструкцією самих генераторів, так і з їх особливостями паралельно роботи з мережею, можливістю подальшої координації роботи та синхронізації параметрів при проєктуванні та підключенні.

При паралельній роботі генераторів із загальною електричною мережею передбачається направлення перетоків потужності як в сторону енергосистеми, так і в бік самого навантаження. При однонаправленому потоці, регулювання напруги можна здійснювати такими способами [29]:

- регулювання перемиканням відпайок трансформатора або автотрансформатора;
- регулювання параметрів загально мережі;
- збільшення або зменшення величини генерованої реактивної потужності;
- використання вольтододаткових трансформаторів і лінійних регуляторів напруги.

При підключенні джерела розосередженої генерації до силового трансформатора, який здійснює живлення споживачів, можливе зростання рівня напруги на вторинній стороні, що приводить до перенапруження у електроприймача [29]. Такий ефект спостерігається, якщо трансформатор підключений до загальної електричної мережі у місці з рівнем напруги вище нормованого або досить близьким до нього.

Основну частину розосереджених станцій становлять установки, які підключаються до загальної мережі з використанням інвертора, це в свою чергу дозволяє здійснювати регулювання параметрів таких станцій. До таких станцій можна віднести відновлювані джерела енергії та мікротурбінні установки. Існує три стратегії інверторного регулювання.

Більшість інверторних установок працюють при одиничному коефіцієнті потужності [44]. Станції з такою стратегією регулювання генерують у мережу тільки активну потужність і не можуть впливати на регулювання напруги в загальній мережі. При використанні інверторів напруги, може бути два варіанти регулювання. По-перше, станція може генерувати реактивну потужність, яка буде обмежена підтримкою встановленого коефіцієнта потужності і обмеженого максимального рівня виробленої повної потужності. По-друге, можлива встановлення допустимого рівня напруги на виході джерела розосередженої генерації. Але слід пам'ятати, що при незалежному від навантаження регулюванні параметрів електростанцій може проявлятися невідповідність генерування та споживання, що приводить до збільшення максимального рівня напруги у самій мережі.

Також досить широкого застосування набули асинхронні генератори в станціях розосередженої генерації. Це зумовлено їх простотою та відносною дешевизною. Але їх використання має і ряд проблем, які мають прямий вплив на стан електричної мережі, основним з яких є високе споживання реактивної енергії, що приводить до необхідності використання додаткового компенсуючого обладнання, що має можливість регулювання. Досить часто така проблема спостерігається у споживачів із змінним графіком навантаження.

2.3.2 Вплив джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії

Несинусоїдальність напруги

Джерела розосередженої генерації, так як і електрообладнання деяких споживачів, може бути джерелом вищих гармонік у криву напруги. Вищі гармоніки генеруються як в самому агрегаті, так і в приладах силової електроніки (інверторах або випрямлячах струму/напруги).

На даний момент більшість електростанцій «зеленої» енергетики працюють на основі використання інверторів. Генерація вищих гармонік у таких приладах найчастіше відбувається у напівпровідникових керованих вентилях (тиристорах), які видають в систему високий рівень вищих гармонік. Вирішення цієї проблеми досягається завдяки використанню нових *IGBT*-транзисторів, які використовують широтно-імпульсну модуляцію при генеруванні «чистої» синусоїди напруги [44].

Також, ще одним джерелом вищих гармонік, є обертові генератори. Їх здатність генерування гармонік може залежати від різних умов: кроку обмотки, нелінійності сердечника, наявності та типу заземлення тощо. Якщо порівнювати різні типи обмоток, то найкращим варіантом буде конфігурація з кроком $2/3$ (даний тип є найменшим генератором третьої гармоніки). Але обмотки з таким кроком мають значно менший повний опір і можуть привести до збільшення гармонійного струму, який протікає через інші джерела генерації, при паралельній роботі.

Також, використання заземлюючих пристроїв у генераторах і підвищувальних трансформаторах, дає змогу обмежити поширення гармонік в мережу. Системи заземлення найчастіше вибирають для зменшення частки третьої гармоніки в системі, що приводить до її виділення тільки на боці джерела розосередженої генерації.

Відхилення та коливання напруги

Однією з головних причин виникнення коливань напруги при використанні джерел розосередженої генерації є використання станцій з непостійним графіком генерування, таких як вітрові та сонячні генеруючі установки (їх графік навантаження напруги залежить від погодних умов у конкретний проміжок часу). Коливання напруги в загальній мережі може бути наслідком швидкого зростання або падіння навантаження.

Провали напруги при роботі джерел розосередженої генерації можуть бути не тільки через нерівномірний графік генерації джерелами відновлюваної енергетики, а й від застосування установок з асинхронними двигунами, які мають значний показник споживання реактивної потужності при запуску. В минулому пункті було вказано, що вирішенням цієї проблеми є підключення компенсаторних установок з можливістю гнучкого регулювання.

Також досить поширеною причиною провалів напруги є робота системної автоматики (автоматичне повторне включення, автоматичне включення резерву при перемиканні між централізованим і розподіленим електропостачанням [45].

Вирішення проблем коливань напруги може бути вирішено декількома шляхами:

- регулювання генерації активної та реактивної потужності;
- активне регулювання напруги;
- підвищення потужності електростанцій;
- використання накопичувальних пристроїв;
- створення гібридних блоків розосередженої генерації, що дасть змогу одночасно використовувати відновлювану і традиційну генерацію, а також накопичення електроенергії [45];
- використання загальної системи регулювання;

- встановлення загального перетворювача (дозволить єдині характеристики для генерованої електроенергії);
- з'єднання джерела розосередженої генерації з окремим споживачем завдяки окремій лінії передачі;
- збільшення загальної пропускної здатності розподільної мережі (такий метод передбачає заміну наявних провідників для подальшого зменшення втрат в загальній мережі).

Несиметрія напруги

Оскільки більша частина малопотужних однофазних генераторів це переважно станції на основі відновлюваних джерел енергії (вітру та сонця), це приводить до появи несиметрії напруги в розподільних мережах. Ця проблема досить гостро постала у віддалених районах у простих споживачів і приватних домогосподарствах.

2.4 Проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії в загальну мережу

2.4.1 Вітрові електричні станції

Через наявність значного потенціалу вироблення енергії з вітру, з'являється підвищений інтерес до розвитку електрифікації сільськогосподарських районів. Але наявний ряд проблем і обмежень для передавання енергії вітру в загальну мережу. Прогнозування швидкості вітру є досить невизначеним елементом генерації, це в свою чергу значно знижує ефективність і безпечність таких систем.

Більшість вітрових турбін, через свої технічні особливості, не здатні підтримувати необхідний рівень реактивної потужності в мережі. Збільшення

використання енергії вітру створює проблему стабільності системи та збільшує вірогідність відключення споживачів від постачання електроенергії. Також вітрові станції мають вагомий вплив на частотні характеристики системи через свою низьку інертність. Тобто використання енергії вітру має прямий вплив на якість й ефективність електропостачання.

З точки зору конструкції частина генераторів підключаються безпосередньо до мережі через окремий виділений трансформатор, тоді як інші мають зв'язок завдяки силовій електроніці, що дозволяє краще керувати режимом роботи електростанції. На даний момент інтеграція великої кількості енергії вітру в електричну мережу вказує, що вони повинні бути в змозі забезпечити оперативне управління напругою, активною та реактивною потужностями, частотою для стабільного й ефективного функціонування системи. З огляду на вищенаведені тези, не доцільним є використання вітрових електростанцій з індукційними генераторами та фіксованою швидкістю, адже вони не дають змогу забезпечити необхідне управління напругою та частотою мережі. Огляд розроблених контролерів для перетворювача станції, підключеної до мережі, показує, що асинхронні генератори з подвійним живленням на даний момент мають найбільш ефективну конструкцію, що дасть змогу здійснювати регулювання реактивної потужності та кутової швидкості та дасть змогу максимізувати значення вихідної потужності. Генератори такого типу також мають змогу підтримувати систему під час провалів напруги. Але одним з основних недоліків систем з таким генератором є спотворення гармонічної складової напруги [46].

У таблиці 2.1 наведено вплив вітрових електростанцій на нормальну роботу електричної мережі та заходи щодо їх вирішення.

Таблиця 2.1 – Вплив вітрових електростанцій на нормальну роботу мережі [46]

№ з/п	Вплив	Причини появи	Заходи з усунення
1.	Нерівномірний графік генерації	Зміна швидкості та напрямку вітру, надмірні пориви вітру	Встановлення накопичувальних елементів, наявність резервного джерела живлення (традиційна електростанція)
2.	Негативний вплив на якість електричної енергії	Асинхронний двигун станції є споживачем реактивної енергії	Встановлення компенсаторів реактивної енергії
3.	Можливість виникнення коливання потужності в точці приєднання станції	Коливання потужності під час сильних поривів вітру	Наявність аварійної системи гальмування, забезпечення достатнього запасу стійкості системи у перетинах
4.	Проблема низької інертності вітрової електростанції	Повна залежність від погодних умов	Встановлення додаткового обладнання, для зменшення впливу на стан електричної мережі

2.4.2 Сонячні електричні станції

Сонячна електроенергія одна з найдоступніших на даний момент у всьому світі. Споживачі зацікавлені у використанні такого необмеженого джерела через його екологічність, гнучкістю проектування і встановлення, а також відсутністю споживання реактивної потужності. Але й наявний ряд проблем, серед яких: велика вартість установки електростанції, низький коефіцієнт корисної дії (до 20 %), важкість прогнозування та коливання потужності через невизначеність сонячного випромінювання. Використання фотоелектричних станцій також має

прямий вплив на значення напруги та частотних характеристик системи. Сама фотоелектрична система розроблена з коефіцієнтом потужності, який рівний одиниці, а безпосередньо характеристики вихідних значень напруги залежать від інвертора. І оскільки сонячні електростанції не мають інерції в роботі, для підтримки частоти в мережі необхідне використання додаткового обладнання, що в свою чергу ще більше збільшує вартість всієї установки.

Фотоелектрична система забезпечує генерацію активної потужності в систему та взагалі не споживає реактивну. У [47] було вивчено перехідні ефекти від хмарності, а сама станція використовувалась як основне джерело енергії для споживачі. Під час дослідів було визначено, що максимальний рівень покриття споживання становив близько 5 %, причому обмеження було створено через малу генеровану потужність кожної панелі.

У таблиці 2.2 наведено вплив сонячної електростанції на нормальну роботу електричної мережі та заходи з їх вирішення.

2.4.3 Напрями використання відновлюваних джерел енергії

Постійний ріст кількості та потужності відновлюваних джерел енергії і розподіленої генерації вимагає нових стратегій для подальшої їх ефективної експлуатації та управління електричною мережею, щоб підтримувати або навіть покращувати якість і надійність електропостачання. Широке використання «зелених електростанцій» (сонця, вітру, біомас), прискорило перехід до більш екологічних джерел енергії. З огляду на вищенаведені тези, можна запропонувати ряд рішень для подальшого ефективного використання джерел відновлюваної енергетики:

1. Балансування потужності з використанням «зелених» електростанцій та накопичувачами енергії. Перевагами такої систем є те, що вона дає змогу здійснити інтеграцію таких електростанцій як на рівні розподільних мереж, так і в енергосистемі з використанням нового ринку електроенергії.

Таблиця 2.2 – Вплив сонячної електростанції на нормальну роботу мережі [48]

№ з/п	Вплив	Причини появи	Заходи з усунення
1.	Нерівномірний графік генерації	Зміна кількості сонячної радіації в залежності від умов (зима-літо, день-ніч, сонячно-хмарно).	Встановлення накопичувальних елементів, наявність резервного джерела живлення (традиційна електростанція)
2.	Негативний вплив на якість електричної енергії	Інвертор сонячної станції є джерелом вищих гармонік для синусоїди напруги	Встановлення вдосконалених інверторів, встановлення випрямлячів
3.	Можливість виникнення коливання потужності в точці приєднання станції	Коливання потужності під час сильного проходження хмар	Забезпечення достатнього запасу стійкості системи у перетинах
4.	Проблема передачі потужності при зниженні робочої напруги більше ніж на 10 % у аварійних режимах	Надмірна чутливість інверторів до рівня напруги	Примусове підтримання напругу у межах

2. Залучення силової електроніки, що грає важливу роль у розподільній генерації й інтеграції відновлюваних джерел в електричну мережу. Швидкий розвиток таких систем дає можливість здійснювати швидке оперативне керування, переключення та підвищення потужностей генеруючих станцій.

3. Зниження втрат від непостійної генерації можна досягти завдяки розподілу згенерованої енергії в більшу кількість географічних районів із невеликими потужностями, та противагу великих станцій в одному районі.

4. Застосування накопичувачів електричної енергії у станціях великої потужності з нелінійним графіком генерації, що дасть змогу зменшити вплив на

загальну електричну мережу. Даний метод приводить до значних додаткових витрат, які можна було б, по домовленості, розділити між власником станції й енергосистемою, наприклад, порівну (ідеальний варіант).

Висновки до розділу 2

1. На сьогодні існує одинадцять основних показників якості електричної енергії в мережі та шість допоміжних. Використання всіх не є ефективним для вивчення стану мережі, тому для кожного конкретного завдання вибирається чотири–п'ять основних.

2. Взаємна робота джерел розосередженої генерації з загальною мережею призводить до зміни основних параметрів електричної мережі та суттєво впливає на якість електричної енергії.

3. На даний момент використання джерел розосередженої генерації є досить складним процесом, який потребує ефективного керування та прогнозування, що дасть змогу в майбутньому зменшити негативний вплив на загальну енергетичну систему.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

3.1 Вплив відновлюваних джерел енергії на розподільні електричні мережі

Використання відновлюваних джерел енергії впливає на розподільні електричні мережі та робить їх активними елементами енергосистем. Це призводить до необхідності внесення змін: перегляду або модернізації у прийнятті стратегії керування, експлуатації та планування електричних мереж. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно ретельно аналізувати питання приєднання відновлюваних джерел енергії у розподільні мережі України [13, 56].

Впровадження таких джерел у розподільній електричній мережі неподалік від споживачів (навантаження) може змінювати напрям потоків потужності. При цьому необхідно виділити три ситуації щодо джерела розосередженої генерації та вузлового навантаження [13, 56]:

1. Власне навантаження кожного вузла в електричній мережі рівне або більше потужності відновлюваного джерела енергії, які підключено до цього вузла.

У цьому випадку встановлені джерела розосередженої генерації в електричній мережі будуть впливати на зменшення втрат потужності у розподільній електричній мережі.

2. В електричній мережі існує щонайменше один вузол, де потужність відновлюваних джерел енергії більша, ніж власне навантаження цього вузла. Однак сумарне значення потужності таких станцій у електричній мережі у цілому менше, ніж сумарне навантаження мережі.

У цьому випадку джерела розосередженої генерації можуть постійно збільшувати втрати потужності у деяких лініях електропередачі розподільної електричної мережі, але, загалом сумарні втрати потужності знижуються.

3. В електричній мережі існує щонайменше один вузол, у якому потужність джерела розосередженої генерації більша, ніж власне навантаження цього вузла. Значення сумарної потужності відновлюваних джерел енергії даної електричної мережі у цілому більше, ніж сумарне навантаження мережі.

У цьому випадку сумарні втрати потужності всієї розподільної електричної мережі будуть більшими, ніж до встановлення відновлюваних джерел енергії. При цьому досить невдалою є ситуація, коли відбувається транспортування електричної енергії в зворотному напрямку, тобто з «кінця» електричної мережі до її початку. Це пов'язано з тим, що переріз проводів ліній електропередачі у розподільних мережах, як правило, зменшується від головної ділянки ліній електропередачі до її «хвоста», а, як відомо, опір лінії електропередачі й її втрати залежать від перерізу проводів.

Величина втрат в лініях визначається їх технічними параметрами та струмом навантаження (рис. 3.1).

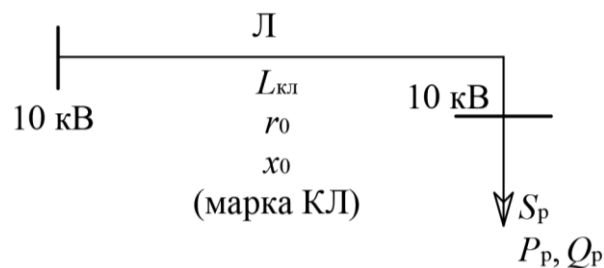


Рисунок 3.1 – Технічні параметри лінії для розрахунку втрат потужності та електричної енергії

Втрати потужності у лінії розраховуються наступним чином:

$$\Delta P_{\text{кл}} = 3I_p^2 r_0 L_{\text{кл}} = 3 \left(\frac{S_p}{\sqrt{3}U_H} \right)^2 r_0 L_{\text{кл}} = 3 \frac{S_p^2}{3U_H^2} r_0 L_{\text{кл}} = \frac{S_p^2}{U_H^2} r_0 L_{\text{кл}} = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_H^2} r_0 L_{\text{кл}},$$

$$\Delta Q_{\text{кл}} = 3I_p^2 x_0 L_{\text{кл}} = 3 \left(\frac{S_p}{\sqrt{3}U_H} \right)^2 x_0 L_{\text{кл}} = 3 \frac{S_p^2}{3U_H^2} x_0 L_{\text{кл}} = \frac{S_p^2}{U_H^2} x_0 L_{\text{кл}} = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_H^2} x_0 L_{\text{кл}},$$

де 3 – кількість фаз лінії;

I_p – розрахункове значення струму навантаження лінії, А;

r_0, x_0 – погонні опори матеріалу проводу кабельної лінії, Ом/км;

$L_{\text{кл}}$ – довжина кабельної лінії, км;

S_p – розрахункове значення повної потужності лінії, кВ·А;

U_H – номінальне значення напруги навантаження лінії, кВ;

P_p – розрахункове значення активної потужності навантаження лінії, кВт;

Q_p – розрахункове значення реактивної потужності навантаження лінії, квар.

Поява у мережі відновлюваних джерел енергії змінює значення величини P_p у більшу чи меншу сторону.

Також, різні джерела розосередженої генерації працюють з різними значеннями коефіцієнта потужності $\cos\phi$, тому їхня реактивна потужність Q_p може змінюватися від незначної генерації (газотурбінні установки тощо) до значного – у масштабах розподільних електричних мереж, споживання (вітрові/сонячні електричні станції та т.п.), що також негативно впливає на величину втрат потужності в електричній мережі [13, 56].

Отже, встановлення відновлюваних джерел енергії може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричній мережі, що в основному

залежить від місць розташування, потужності, рівня впровадження таких електростанцій в електричній мережі, їхнього коефіцієнта потужності, а також від топології електричної мережі тощо.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії також здійснює вплив на рівень напруги мережі:

1. Вплив на рівень напруги в усталеному режимі роботи електричної мережі [13, 56]. У розподільних мережах радіального типу, зниження напруги відбувається вздовж напрямку постачання споживачів, від початку лінії електропередачі до її «хвоста». Після встановлення таких джерел енергії у цій мережі відбувається зниження навантаження живильного фідера, а напруга вздовж лінії електропередачі може зростати. Важливими при цьому є значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ стації і тип генератора (асинхронний або синхронний). Використання відносно потужних синхронних генераторів у деяких випадках може призводити до перевищення допустимого рівня напруги ($>1,1U_{\text{ном}}$). Отже, зміни значення напруги залежить від місця встановлення відновлюваних джерел енергії, їхньої потужності та значення коефіцієнта потужності $\cos\phi$ (споживання або генерація).

2. Поява відновлюваних джерел енергії здійснює вплив на коливання напруги в електричній мережі [13, 56]. У традиційних розподільних мережах, активне та реактивне навантаження вузлів змінюється з часом, що викликає певні коливання рівня напруги в електричних мережах. У напрямку від початку до «хвоста» лінії електропередачі коливання напруги, як правило, збільшується. Якщо навантаження зосереджено в основному біля «хвоста» лінії електропередачі, то рівень значення напруги буде коливатися інтенсивніше. Джерела розосередженої генерації, після приєднання до розподільної електричної мережі, будуть впливати на коливання рівня значень напруги у вузлах, зменшуючи або збільшуючи. Коли джерела розосередженої генерації працюють узгоджено зі споживанням, тобто, їхня потужність зменшується

(збільшується) при зменшенні (збільшенні) споживання у вузлах, вони будуть урегульовувати (згладжувати) коливання напруги. Однак, коли джерела розосередженої генерації працюють неузгоджено зі споживанням, оскільки потужність таких станцій залежить від наявності первинних ресурсів і вихідні характеристики яких досить складно контролювати (наприклад, інтенсивність сонячної радіації, швидкість вітру), то у такому випадку джерела розосередженої генерації можуть значно збільшити коливання напруги в електричних мережах. Окрім того, деяким джерелам розосередженої генерації притаманна сильна мінливість вихідної потужності, що суттєво впливає на коливання рівнів значень напруги у вузлах мережі, ефект тим сильніший, чим більша встановлена потужність відновлюваного джерела енергії.

При цьому значення напруги на ділянці мережі визначається наступним чином

$$U_{\phi} = \frac{(P_p r_0 + Q_p x_0) L_{\text{кл}}}{U_{\text{н}}},$$

де P_p – розрахункове значення активної потужності навантаження лінії, кВт;

Q_p – розрахункове значення реактивної потужності навантаження лінії, квар.

r_0 , x_0 – погонні активний і реактивний опори однієї фази дроту (або кабелю), Ом/км;

$L_{\text{кл}}$ – довжина ділянки мережі, км;

$U_{\text{н}}$ – номінальне значення напруги навантаження лінії, кВ.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у розподільні електричні мережі чинить досить суттєвий вплив на якість електричної енергії [13, 56]:

1. Поява відновлюваних джерел енергії призводять до збільшення дози флікера, що може відбуватися при ввімкненні або вимкненні потужних електростанцій у розподільних електричних мережах, раптовій зміні потужності відновлюваних електростанцій, взаємодії між відновлюваними джерелами енергії та регулюючими пристроями.

2. Відновлювані джерела енергії генерують гармоніки високих порядків. При цьому відновлювані джерела енергії або самі можуть бути джерелами гармонік вищих порядків або приєднуватися до розподільної електричної мережі через інвертор, який генерує в мережу гармоніки вищих порядків, що характерно, наприклад, для сонячних і вітрових електричних станцій.

3. Відновлювані джерела енергії впливають на провали напруги, що, пов'язано з типом генератора (асинхронний або синхронний). Наприклад, при електростанції з синхронними генераторами напруга після провалу відновлюється майже до початкового рівня. А з асинхронними генераторами напруга не відновлюється до початкового рівня у зв'язку зі зниженням підтримки за реактивною потужністю [13, 56]. Також необхідно зазначити, що загальний вплив відновлюваних джерел енергії на провали напруги хоча й залежить від потужності, але не досить критично.

Якщо відновлювані джерела енергії використовуються тільки як резервні джерела живлення, то можна говорити, що надійність системи живлення підвищується. Але коли вони працюють паралельно з системою електропостачання, то надійність постачання споживачів у деяких випадках може знижуватись. Наприклад, в електричній мережі, де є достатня кількість відновлюваних джерел енергії та їхня робота не є скоординованою між собою, буде відбуватися зниження надійності системи. Зниження рівня надійності електропостачання може відбуватися за високого скупчення електростанцій одного типу (наприклад, при скупченні сонячних електричних станцій, потужність яких залежить від інтенсивності сонячної радіації).

При цьому досить нагально постає проблема автономної роботи таких електростанцій, так звана проблема «островів» [13, 56]. Відновлювані джерела енергії, як правило, не призначено для постачання фрагментів мережі самостійно, оскільки вони не в змозі підтримувати адекватний рівень якості електричної енергії [13, 56]. Враховуючи існуючі вимоги стандартів в системах електропостачання розвинених країн, відновлювані джерела енергії повинні за 100–300 мс переключитися на автономне навантаження [13, 56]. Встановлення відновлюваних джерел енергії призводить до значного підвищення надійності електропостачання лише певних споживачів.

Більш кращим засобом підвищення надійності електропостачання при виникненні збурень в енергосистемі є формування «островів», які не обмежуються лише відновлюваними джерелами енергії й автономним навантаженням, а охоплюють певні ділянки електричної мережі з збалансованою генерацією та навантаженням. Вказане рішення дасть можливість більш ефективно використовувати встановлену потужність відновлюваних електростанцій, суттєво підвищити надійність розподільних електричних мереж і розширити зону охоплення споживачів електричної енергії. Застосування зазначеного варіанта підвищення надійності електропостачання дає можливість на якісно новому рівні вирішити багато відомих проблем, наприклад, відновлення електропостачання знеструмлених споживачів [13, 56]. Але цей варіант потребує серйозного технічного переоснащення електричних мереж, встановлення сучасних не досить дешевих технічних засобів, а також розробки відповідних вказівок для обслуговуючого оперативного персоналу.

Отже, місця інтеграції та потужність відновлюваних джерел енергії суттєво впливають на низку характеристик електричної мережі (наприклад, основні характеристики: втрати електричної енергії, рівень напруги у вузлах електричної мережі, струми у гілках електричної мережі та струми короткого замикання). Це у свою чергу, впливає на вибір електроенергетичного устаткування й обладнання,

планування режимів роботи тощо. Описана задача найчастіше постає як багатокритеріальна оптимізаційна задача з певними обмеженнями [13, 56]. У більшості випадків, при цьому мінімізують втрати активної потужності ΔP [13, 56] при різноманітних ситуаціях в електричних мережах: наприклад, обсяги, ступінь скупчення та територіальне розміщення відновлюваних джерел енергії в електричних мережах, тощо.

За даною тематикою було виконано масштабні дослідження у різних країнах, однак, не зважаючи на це вона не є повністю вирішеною. Зокрема є невирішеними ціла низка питань. По перше, це необхідність врахування впливу режимів реактивної потужності, типу відновлюваних джерел енергії (особливо) й можливих «острівних» режимів роботи енергосистеми, у разі втрати основного джерела живлення внаслідок відокремлення відновлюваного джерела від енергосистеми з незбалансованим навантаженням.

3.2 Формування системи критеріїв і обмежень, які оцінюють різні варіанти вирішення задачі оптимального підключення відновлюваних джерел енергії

Для визначення оптимального вирішення задачі необхідно прискіпливу увагу приділяти формуванню системи критеріїв й обмежень. Враховуючи найпоширеніші критерії й обмеження, що використовуються при розв'язанні задачі умовно їх можна розділити на економічні та технічні, за якими можна оцінити місця приєднання, потужності та типи відновлюваних джерел енергії, а також визначити вплив приєднаних джерел на режимні параметри електричної мережі.

До економічних критеріїв можна віднести: вартість джерела розосередженої генерації, вартість його встановлення та приєднання відновлюваних джерел енергії до мережі, а також вартість виробленої ними

електроенергії. Економічні критерії характеризують інвестиційну привабливість такого типу генерації для інвестора.

До технічних критеріїв можна віднести втрати електроенергії у зовнішній мережі (після точки балансової належності джерел), втрати електроенергії у власних мережах (до точки балансової належності) та характеристики генерування цих джерел. Спробу узагальнення критеріїв наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Критерії		Характеристика критерію
Технічні критерії	Тип джерела розосередженої генерації	<p>Різні типи відновлюваних джерел енергії мають різні робочі характеристики.</p> <p>Наприклад, при формуванні добового типового графіку генерації вітрової електричної станції пропонується виділити найбільш характерні періоди доби: зі сходом сонця швидкість вітру збільшується та близько 13–14 години досягає найбільшого значення, після чого спадає; ввечері та вночі спостерігається слабкий вітер або штиль, за якого вітрова електрична станція не буде працювати.</p> <p>Для сонячної електричної станції при формуванні добового графіку генерації пропонується виділити періоди доби тривалістю одна година. Кількість періодів залежить від тривалості сонячного дня (від часу сходу та заходу сонця).</p> <p>Також різні типи генераторних установок мають різний тип регулювання генерації реактивної потужності. Від типу такого джерела та його потужності залежить вартість згенерованої електроенергії та вартість монтажу установки.</p> <p>За допомогою цього критерію можна описати роботу такої станції у складі електричної мережі</p>

Продовження таблиці 3.1

	Втрати потужності й електроенергії в електричній мережі	<p>Відновлювані джерела енергії безпосередньо впливають на втрати потужності й електроенергії електричній мережі, у яку їх інтегровано. Цей критерій характеризує ефективність інтеграції відновлюваних джерел енергії з точки зору постачальника електричної енергії.</p> <p>Втрати потужності й електроенергії у власній електричній мережі у деяких випадках можуть бути досить значними – це у свою чергу призводить до зростання терміну окупності проекту. Цей критерій характеризує ефективність інтеграції відновлюваних джерел енергії з точки зору інвестора цього проекту.</p>
Економічні критерії	Монтаж відновлюваних джерел енергії до електричної мережі	<p>Врахування тільки технічних критеріїв є недостатнім – можна отримати економічно неоптимальне рішення. Економічні критерії характеризують вартість встановлення різних типів електростанцій, вартість їх інсталяції до електричних мереж різних класів напруг, які узгоджуються з потужністю встановленої станції.</p>

Втрати електроенергії у електричній мережі. Джерела енергії безпосередньо впливають на втрати електроенергії мережі, до якої вони приєднані. Цей критерій характеризує ефективність встановлення таких джерел з точки зору оператора електричної мережі. Втрати електроенергії у власній електричній мережі у деяких випадках можуть бути досить значними, що в свою чергу збільшує термін окупності певного проекту. Цей критерій характеризує ефективність системи збору потужності з точки зору інвестора.

Вихідні характеристики генерування відновлюваних джерел енергії. Різні типи джерел мають різні робочі характеристики. Наприклад, сонячна

електростанція вночі не генерує електричну енергію, тоді як вдень потужність цієї станції змінюється в певних діапазонах, межі яких залежать від хмарності, положення сонця тощо; вітроелектрична станція генерує потужність у майже будь-який час доби, проте вихідна потужність цієї станції коливається в широких діапазонах – від нуля під час штилю до встановленої або номінальної при високих швидкостях вітру. Окрім цього різні типи генераторних установок мають різне регулювання реактивної потужності. Цей критерій характеризує роботу джерел генерації енергії у складі електричної мережі.

Обмеженнями може бути запропоновано відхиленням напруги δU вузлів та значення струму у лініях мережі. Режимні параметри мережі, у яку інтегровано відновлювану генерацію, не мають виходити за допустимі межі, наприклад, згідно ГОСТ 13109-97: значення напруги на шинах має знаходитися у межах $\pm 10\%$ від номінального, а струм у лініях має не перевищувати максимального можливого – допустиме значення. Обмеження наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Назва	Характеристика
Відхилення напруги δU у точках електричної мережі	Режимні параметри електричної мережі, в яку інтегровано відновлювані джерела енергії, не мають виходити за допустимі межі згідно нормативних документів. Наприклад, значення напруги на шинах має бути у межах $0,9U_{\text{ном}} \leq U_{\phi} \leq 1,1U_{\text{ном}}$; завантаження елементів має бути $\leq 100\%$
Максимальне значення струмів (завантаження елементів електричної мережі)	
Втрати потужності (ΔP та ΔQ) й електроенергії (ΔA_P та ΔA_Q) в електричній мережі	Інтеграція відновлюваних джерел енергії у мережу не має призводити до зростання втрат потужності та, відповідно, електричної енергії. Необхідно враховувати не лише економічні інтереси інвестора, як критерій оптимальності рішення, а і технічний критерій (оскільки можливі випадки зі значними втратами потужності в мережі для оптимальних рішень згідно економічних критеріїв)

У якості додаткового обмеженням при розв'язанні задачі оптимального приєднання відновлюваних джерел енергії можна запропонувати допустимий діапазон коливання встановленої потужності кожного окремого та/або всіх таких джерел генерації енергії [56].

Узагальнення додаткових обмежень наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Назва	Характеристика
Тип джерела розосередженої генерації	Врахування типу джерела, яке може бути застосовані при розв'язанні задачі (наприклад, сонячна та вітрова електростанції, тощо)
Максимальна та мінімальна потужності	Діапазони, в яких може варіюватися встановлена потужність кожної окремої та/або всіх електростанцій разом
Крок пошуку значення оптимальної потужності	Крок дискретності, за яким змінюється значення потужності відновлюваних джерел енергії, безпосередньо впливає на кількість можливих розв'язків. Недоцільно визначати значення оптимальної потужності з точністю, наприклад, 0,5 кВт, це збільшує кількість можливих схожих варіантів розв'язку задачі, а втілення такого розв'язку навряд чи буде технічно можливим. Найбільш доцільним є встановлення значення кроку потужності, яке є порівнюваним із потужністю установок відновлюваних джерел енергії

3.3 Постановка задачі та формування відповідної цільової функції

Задача визначення величин потужності відновлюваних джерел енергії та оптимальних місць їх встановлення є однією з першочергових, які мають бути враховано на етапі проєктування електричних мереж. Коректно (вірно) вибрана точка приєднання розосередженої генерації до мережі та його потужність можуть покращити роботу мережі та забезпечити додаткові економічні переваги для

постачальника електричної енергії, так і як для споживача [50]. Ця задача є багатокритеріальною, оптимізаційною. Існує необхідність врахувати не лише економічні інтереси постачальника та споживача електричної енергії, а й можливі проблеми на рівні системного оператора, які можуть виникнути через встановлення значних потужностей розосередженої генерації – виникає доцільність врахування якості електричної енергії, наявності запасу пропускної спроможності ліній тощо.

Для завдання розміщення відновлюваних джерел енергії у мережі характерна багатокритеріальність. Запропонуємо ряд критеріїв оптимізаційної задачі вибору місця розташування та потужності джерела розосередженої генерації. Перелік критеріїв може бути розширений.

Інвестиції. У ринкових умовах найважливішу роль відіграє фінансова складова. Жорстка обмеженість інвестиційних коштів змушує робити вибір, що балансує між ціною й якістю. Таким чином, критерій інвестицій є однією з найважливіших сторін реалізації будь-якого технічного проєкту [51]. Економічний критерій характеризує вартість встановлення різних типів електростанцій, вартість їх підключення до електричних мереж різних класів напруг.

Коефіцієнт, наведений нижче, дає можливість врахувати цей момент

$$K_{\text{інв}} = 1 - \frac{Ц_{\text{рг}}}{Ц_{\text{max}}}, \quad K_{\text{інв}} \in [0; 1],$$

де $Ц_{\text{рг}}$ – вартість генеруючого агрегату потужності розосередженої генерації з установкою (підключення до електричних мереж), грн;

$Ц_{\text{max}}$ – максимально можливі інвестиційні кошти для реалізації проєкту, грн.

Звичайно інвестор зацікавлений у найменшій вартості генеруючого агрегату, тобто $C_{PT} \rightarrow \min$. Чим ближче коефіцієнт $K_{\text{інв}}$ до одиниці, тим більш вигідним є проєкт. Математично це відображається так

$$K_{\text{інв}} \rightarrow \max.$$

Втрати активної потужності. Джерела розосередженої генерації можуть сприяти зниженню втрат активної потужності в мережах, оскільки дають можливість розвантажити лінії електропередачі [52]. У той же час можливий реверсивний потік по лініях електропередачі може привести до збільшення втрат потужності. Наведено нижче коефіцієнт, який відображає втрати активної потужності в мережі:

$$K_{\Delta P} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{факт}}}{\Delta P_{\text{безРГ}}}, \quad K_{\Delta P} \in [0; 1],$$

де $\Delta P_{\text{факт}}$ – фактичні втрати активної потужності у розподільній мережі після встановлення джерела розосередженої генерації заданої потужності у певну точку розподільної мережі, кВт;

$\Delta P_{\text{безРГ}}$ – втрати активної потужності у розподільній мережі до встановлення джерела розосередженої генерації, кВт.

Джерела розосередженої генерації безпосередньо впливають на втрати електроенергії мережі, до якої вони приєднані. Цей коефіцієнт характеризує ефективність встановлення розосередженої генерації з точки зору оператора розподільних мереж. Чим ближче до одиниці коефіцієнт $K_{\Delta P}$, тим більш вигідне становище розосередженої генерації було вибрано з точки зору даного критерію.

Математично цей коефіцієнт відображається так:

$$K_{\Delta P} \rightarrow \max .$$

Втрати реактивної потужності. Аналогічно джерела розосередженої генерації можуть сприяти зниженню втрат реактивної потужності в мережах, оскільки дають змогу розвантажити лінії електропередачі [52]. У той же час можливий реверсивний потік по лініях електропередачі може привести до збільшення втрат потужності. Наведемо коефіцієнт, який відображає втрати реактивної потужності в мережі

$$K_{\Delta Q} = 1 - \frac{\Delta Q_{\text{факт}}}{\Delta Q_{\text{безРГ}}}, \quad K_{\Delta Q} \in [0; 1],$$

де $\Delta Q_{\text{факт}}$ – фактичні втрати реактивної потужності у розподільній мережі після встановлення джерела розосередженої генерації заданої потужності у певну точку розподільної мережі, кВт;

$\Delta Q_{\text{безРГ}}$ – втрати реактивної потужності у розподільній мережі до встановлення джерела розосередженої генерації, кВт.

Чим ближче до одиниці коефіцієнт $K_{\Delta Q}$, тим більш вигідне становище розосередженої генерації було вибрано з точки зору даного критерію. Математично це відображається так

$$K_{\Delta Q} \rightarrow \max .$$

Рівень напруги. Ще однією вигодою, яку можна отримати від впровадження пристроїв розосередженої генерації у мережі, є поліпшення

параметрів напруги в мережі. Сформулюємо цей критерій з точки зору максимального відхилення значення напруги від номінального [53]. Даний показник також буде використаний для визначення найбільш перспективного вузла для установки розосередженої генерації:

$$K_{\delta U} = 1 - \frac{|U_{\text{н}} - U_{\text{факт}}|}{U_{\text{н}}}, \quad K_U \in [0; 1],$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальне значення напруги, кВ;

$U_{\text{факт}}$ – фактичне значення напруги після встановлення джерела розосередженої генерації заданої потужності у певну точку розподільної мережі, кВ.

При цьому необхідно пам'ятати, що згідно [54] відхилення напруги від номінального значення має знаходитися у регламентованих межах

$$\delta U_{\text{норм}} = \frac{|U_{\text{н}} - U_{\text{факт}}|}{U_{\text{н}}} \leq 5\%.$$

Багатокритеріальний показник. Для оцінки роботи розподільної мережі за вищенаведеними критеріями вводиться багатокритеріальний показник. Дана величина є безрозмірною і враховує всі вищенаведені технічні й економічні критерії [55]

$$\begin{aligned} F(x) &= \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \lambda_3 f_3(x) + \lambda_4 f_4(x) = \\ &= \lambda_1 K_{\text{інв}} + \lambda_2 K_{\Delta P} + \lambda_3 K_{\Delta Q} + \lambda_4 K_{\delta U}, \quad F(x) \in [0; 1] \end{aligned}$$

де λ_i – вагові коефіцієнти, щоб задати відповідну значимість кожному критерію, в.о.,

$$\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1, \quad \lambda_i \in [0; 1].$$

У таблиці 3.4 наведемо можливі значення вагових коефіцієнтів.

Таблиця 3.4 – Вагові коефіцієнти

Ваговий коефіцієнт	$\lambda_1(K_{\text{інв}})$	$\lambda_2(K_{\Delta P})$	$\lambda_3(K_{\Delta Q})$	$\lambda_4(K_{\delta U})$	$\sum_{i=1}^4 \lambda_i$
Значення	0,5	0,25	0,05	0,2	1

Таким чином, багатокритеріальний показник чисельно описує вплив джерела розосередженої генерації із заданою потужністю в заданій точці підключення до розподільної мережі на технічні експлуатаційні характеристики системи, включаючи економічний показник, який представляє собою інвестиційний капітал.

Чим ближче значення багатокритеріального показника до одиниці, тим більший позитивний ефект досягається від впровадження джерела розосередженої генерації. Математично це відображається так

$$F(x) \rightarrow \max.$$

Крок, за яким змінюється значення потужності розосередженої генерації, безпосередньо впливає на кількість можливих розв’язків. Недоцільно визначати значення оптимальної потужності з точністю, наприклад, 0,5 кВт, це збільшує кількість можливих «ідентичних» варіантів розв’язку задачі, а втілення такого розв’язку навряд чи буде технічно можливим. Найбільш доцільним є

встановлення значення кроку потужності, яке є порівнюваним із потужністю агрегатів розосередженої генерації.

3.3 Результати розрахунково-модельних випробувань

Для проведення подальших математичних розрахунків було використано найпростішу радіальну систему з чотирма вузлами навантаження, яка зображена на рис 3.2. Вихідні параметри для даної схеми:

- довжина ліній: $L = 50$ м;
- напруга мережі: $U_n = 0,38$ кВ;
- активний опір: $r_0 = 0,3$ Ом/км;
- реактивний опір: $x_0 = 0,08$ Ом/км;
- активне навантаження вузлів: $P_1 = 6$ кВт, $P_2 = 10$ кВт, $P_3 = 7$ кВт, $P_4 = 8$ кВт;
- реактивне навантаження вузлів: $Q_1 = 1$ квар, $Q_2 = 1$ квар, $Q_3 = 1$ квар, $Q_4 = 1$ квар;
- максимальне значення інвестицій $C_{\max} = 600\,000$ грн.

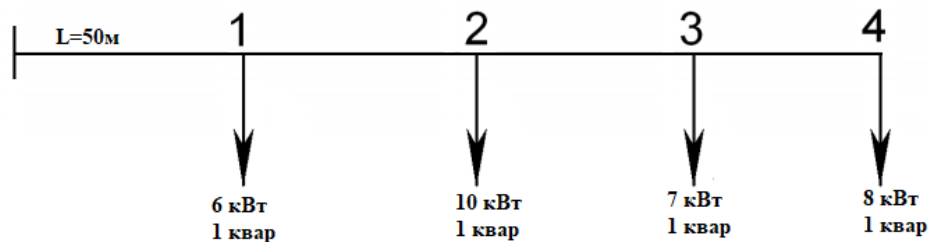


Рисунок 3.2 – Схема електричної мережі

Розрахунок будемо проводити для п'яти різних сонячних електростанцій, які представлено в таблиці 3.5, з різною потужністю і вартістю.

Таблиця 3.5 – Характеристики сонячних електростанцій [57]

№ п\п	1	2	3	4	5
Потужність, кВт	5	10	15	20	30
Вартість, грн	110 208	203 476	280 448	350 924	522 368

Спочатку необхідно провести розрахунки параметрів системи без підключення джерела відновлюваної енергії. Схему і початкові дані наведено вище.

Втрати активної потужності будуть рівні:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{01} + \Delta P_{12} + \Delta P_{23} + \Delta P_{34} = 3r_0 L \left(\frac{P_{01}^2 + Q_{01}^2}{3U_H^2} + \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{3U_H^2} + \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{3U_H^2} + \frac{P_{34}^2 + Q_{34}^2}{3U_H^2} \right) = \\ &= \frac{0,05 \cdot 0,3}{0,38^2} ((8 + 7 + 10 + 6)^2 + (1 + 1 + 1 + 1)^2 + (8 + 7 + 10)^2 + (1 + 1 + 1)^2 + (8 + 7)^2 + (1 + 1)^2 + \\ &+ 8^2 + 1^2) = 0,104 \cdot 1905 = 198,12 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Втрати реактивної потужності розраховуються за формулою аналогічно, але активний опір змінюємо на реактивний:

$$\Delta Q_{\Sigma} = \frac{0,05 \cdot 0,08}{0,38^2} \cdot 1905 = 53,34 \text{ вар}.$$

Також необхідно вирахувати падіння напруги у четвертому (кінцевому вузлу), використовуючи формулу:

$$\begin{aligned}U_{\phi 4} &= U_H - \Delta U_{01} - \Delta U_{12} - \Delta U_{23} - \Delta U_{34} = U_H - \frac{(P_{01}r_0 + Q_{01}x_0)L_{01}}{U_H} - \frac{(P_{01}r_0 + Q_{01}x_0)L_{01}}{U_H - \Delta U_{01}} - \\ &- \frac{(P_{01}r_0 + Q_{01}x_0)L_{01}}{U_H - U_{01} - \Delta U_{12}} - \frac{(P_{01}r_0 + Q_{01}x_0)L_{01}}{U_H - \Delta U_{01} - \Delta U_{12} - \Delta U_{23}} = 0,38 - \frac{0,05 \cdot (31 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,08)}{0,38} -\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{0,05 \cdot (25 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,08)}{0,38 - 1,266 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,05 \cdot (15 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,08)}{0,38 - 2,288 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,05 \cdot (8 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,08)}{0,38 - 2,905 \cdot 10^{-3}} = \\
& = 0,38 - 1,266 \cdot 10^{-3} - 1,022 \cdot 10^{-3} - 0,617 \cdot 10^{-3} - 0,329 \cdot 10^{-3} = 0,3 \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

У наступних прикладі буде наведена ситуація, коли сонячна електростанція, з встановленою потужністю 5 кВт, буде підключена до кожного вузла відповідно. Розрахунок параметрів буде відбуватися за аналогічними формулами, але з врахуванням потужності генеруючого агрегату. Схема мережі наведена на рис 3.3.

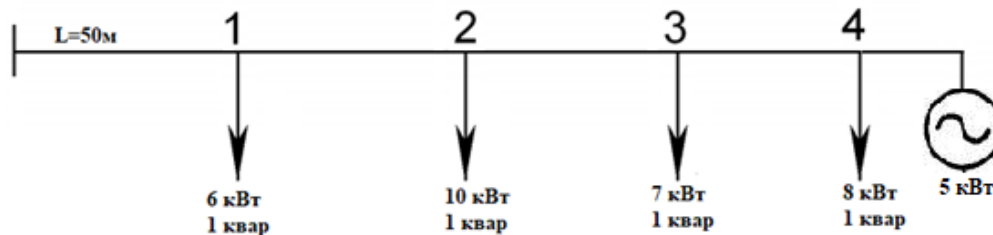


Рисунок 3.3 – Схема електричної мережі з підключеним джерелом розосередженої генерації

Втрати активної потужності будуть рівні:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\Sigma 4} &= \frac{0,05 \cdot 0,3}{0,38^2} ((8 + 7 + 10 + 1)^2 + (1 + 1 + 1 + 1)^2 + (10 + 7 + 3)^2 + (1 + 1 + 1)^2 + (7 + 3)^2 + \\
&+ (1 + 1)^2 + 3^2 + 1^2) = 0,104 \cdot 1215 = 126,36 \text{ Вт}.
\end{aligned}$$

Втрати реактивної потужності:

$$\Delta Q_{\Sigma 4} = \frac{0,05 \cdot 0,08}{0,38^2} \cdot 1215 = 34,02 \text{ вар}.$$

Падіння напруги:

$$\begin{aligned}
 U_{\phi 4} &= 0,38 - \frac{0,05 \cdot (26 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,08)}{0,38} - \frac{0,05 \cdot (20 \cdot 0,3 + 3 \cdot 0,08)}{0,38 - 1,068 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,05 \cdot (10 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,08)}{0,38 - 1,891 \cdot 10^{-3}} - \\
 &- \frac{0,05 \cdot (3 \cdot 0,3 + 1 \cdot 0,08)}{0,38 - 2,309 \cdot 10^{-3}} = 0,38 - 1,068 \cdot 10^{-3} - 0,823 \cdot 10^{-3} - 0,418 \cdot 10^{-3} - 0,130 \cdot 10^{-3} = \\
 &= 0,3776 \text{ кВ}.
 \end{aligned}$$

Маючи всі необхідні дані, можна провести розрахунок коефіцієнтів по кожній складовій (інвестиції, втрати активної та реактивної потужностей, падіння напруги у кінцевому вузлі). Значення вагових коефіцієнтів наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вагові коефіцієнти

Ваговий коефіцієнт	$\lambda_1(K_{\text{інв}})$	$\lambda_2(K_{\Delta P})$	$\lambda_3(K_{\Delta Q})$	$\lambda_4(K_{\delta U})$
Значення	0,45	0,25	0,1	0,2

Коефіцієнт інвестицій:

$$K_{\text{інв}} = 1 - \frac{\Pi_{\text{рГ}}}{\Pi_{\text{max}}} = 1 - \frac{110\,208}{600\,000} = 0,816.$$

Коефіцієнт втрат активної потужності:

$$K_{\Delta P} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{факт}}}{\Delta P_{\text{безрГ}}} = 1 - \frac{126,36}{198,12} = 0,362.$$

Коефіцієнт втрат реактивної потужності:

$$K_{\Delta Q} = 1 - \frac{\Delta Q_{\text{факт}}}{\Delta Q_{\text{безРГ}}} = 1 - \frac{34,02}{53,34} = 0,362.$$

Коефіцієнт падіння напруги у кінцевому вузлу схеми:

$$K_{\delta U} = 1 - \frac{|U_{\text{н}} - U_{\text{факт}}|}{U_{\text{н}}} = 1 - \frac{|0,38 - 0,3776|}{0,38} = 0,994.$$

Після розрахунку всіх необхідних коефіцієнтів, з'являється необхідність ввести багатокритеріальний показник, який покаже ефективність встановлення такої конфігурації саме в четвертому вузлу схеми. Розрахунок його буде здійснюватися за формулою:

$$F(x) = 0,45 \cdot 0,816 + 0,25 \cdot 0,362 + 0,1 \cdot 0,368 + 0,2 \cdot 0,994 = 0,693.$$

Аналогічні розрахунки для наступних точок та інших потужностей станції виконаємо у програмі *Microsoft Excel*. Отримані результати зведемо в єдину таблицю 3.7.

Таблиця 3.7 – Зведені результати розрахунків

Потужність електростанції, кВт		Параметри схеми						Коефіцієнти			
		4	3	2	1			4	3	2	1
5	$\Pi_{\text{PT}}=$	110208	110208	110208	110208		$K_{\text{iHB}}=$	0,816	0,816	0,816	0,816
	$\Delta P_{\text{PT}}=$	126,36	132,08	145,08	168,48		$K_{\Delta P}=$	0,362	0,333	0,268	0,150
	$\Delta Q_{\text{PT}}=$	34,02	35,56	39,06	45,36		$K_{\Delta Q}=$	0,362	0,333	0,268	0,150
	$U_{\phi}=$	0,3776	0,3774	0,3772	0,377		$K_{\delta U}=$	0,994	0,993	0,993	0,992
							$F(x)=$	0,693	0,683	0,660	0,618
10	$\Pi_{\text{PT}}=$	203476	203476	203476	203476		$K_{\text{iHB}}=$	0,661	0,661	0,661	0,661
	$\Delta P_{\text{PT}}=$	75,4	81,64	102,44	144,04		$K_{\Delta P}=$	0,619	0,588	0,483	0,273
	$\Delta Q_{\text{PT}}=$	20,3	21,98	27,58	38,78		$K_{\Delta Q}=$	0,619	0,588	0,483	0,273
	$U_{\phi}=$	0,3781	0,3779	0,3775	0,3772		$K_{\delta U}=$	0,995	0,994	0,993	0,993
							$F(x)=$	0,713	0,702	0,665	0,591
15	$\Pi_{\text{PT}}=$	280448	280448	280448	280448		$K_{\text{iHB}}=$	0,533	0,533	0,533	0,533
	$\Delta P_{\text{PT}}=$	45,24	46,8	70,2	124,8		$K_{\Delta P}=$	0,772	0,764	0,646	0,370
	$\Delta Q_{\text{PT}}=$	12,18	12,6	18,9	33,6		$K_{\Delta Q}=$	0,772	0,764	0,646	0,370
	$U_{\phi}=$	0,3786	0,3785	0,3783	0,3779		$K_{\delta U}=$	0,996	0,996	0,996	0,994
							$F(x)=$	0,709	0,706	0,665	0,568
20	$\Pi_{\text{PT}}=$	350924	350924	350924	350924		$K_{\text{iHB}}=$	0,415	0,415	0,415	0,415
	$\Delta P_{\text{PT}}=$	35,88	27,56	48,36	110,76		$K_{\Delta P}=$	0,819	0,819	0,861	0,441
	$\Delta Q_{\text{PT}}=$	9,66	7,42	13,02	29,82		$K_{\Delta Q}=$	0,951	0,819	0,861	0,441
	$U_{\phi}=$	0,3786	0,3787	0,3784	0,776		$K_{\delta U}=$	0,998	0,996	0,997	2,042
							$F(x)=$	0,686	0,673	0,687	0,750

Продовження таблиці 3.7.

30	$\Pi_{\text{PГ}}=$		0	0	0		$K_{\text{iHB}}=$	1,000	1,000	1,000	1,000
	$\Delta P_{\text{PГ}}=$	79,56	35,88	35,88	98,28		$K_{\Delta P}=$	0,598	0,819	0,819	0,504
	$\Delta Q_{\text{PГ}}=$	21,42	9,66	9,66	26,46		$K_{\Delta Q}=$	0,598	0,819	0,819	0,504
	$U_{\phi}=$	0,3782	0,3787	0,3787	0,3779		$K_{\delta U}=$	0,995	0,997	0,997	0,994
							$F(x)=$	0,859	0,936	0,936	0,825

Використовуючи вищенаведені дані, побудуємо графік по кожному параметру розрахунку. Це дозволить наочно відобразити вплив джерел на стан мережі в цілому. Відображати графік цін є недоцільним, адже ціна є сталою і тому, функція буде лінійною.

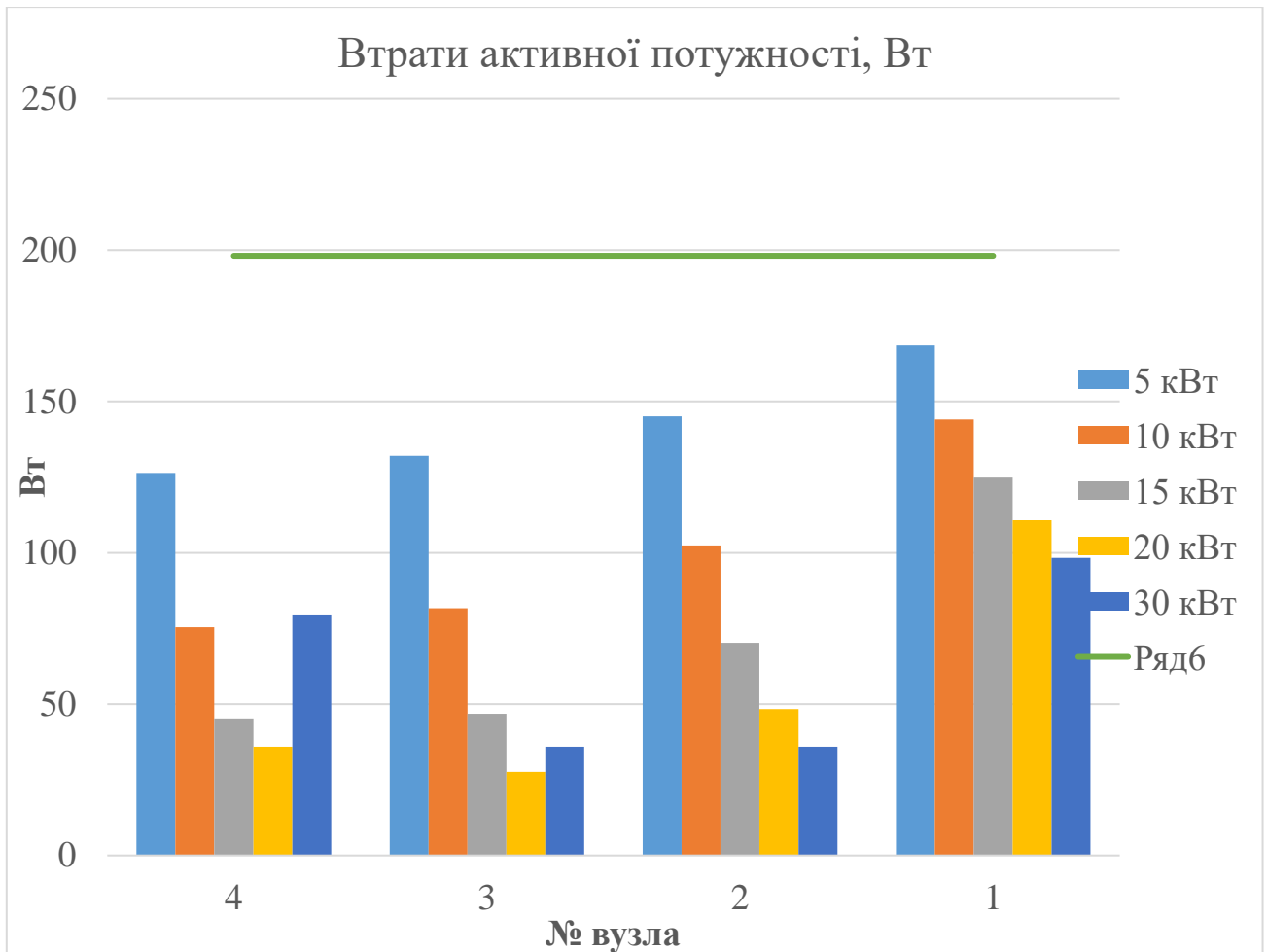


Рисунок 3.4 – Зміна втрат активної потужності

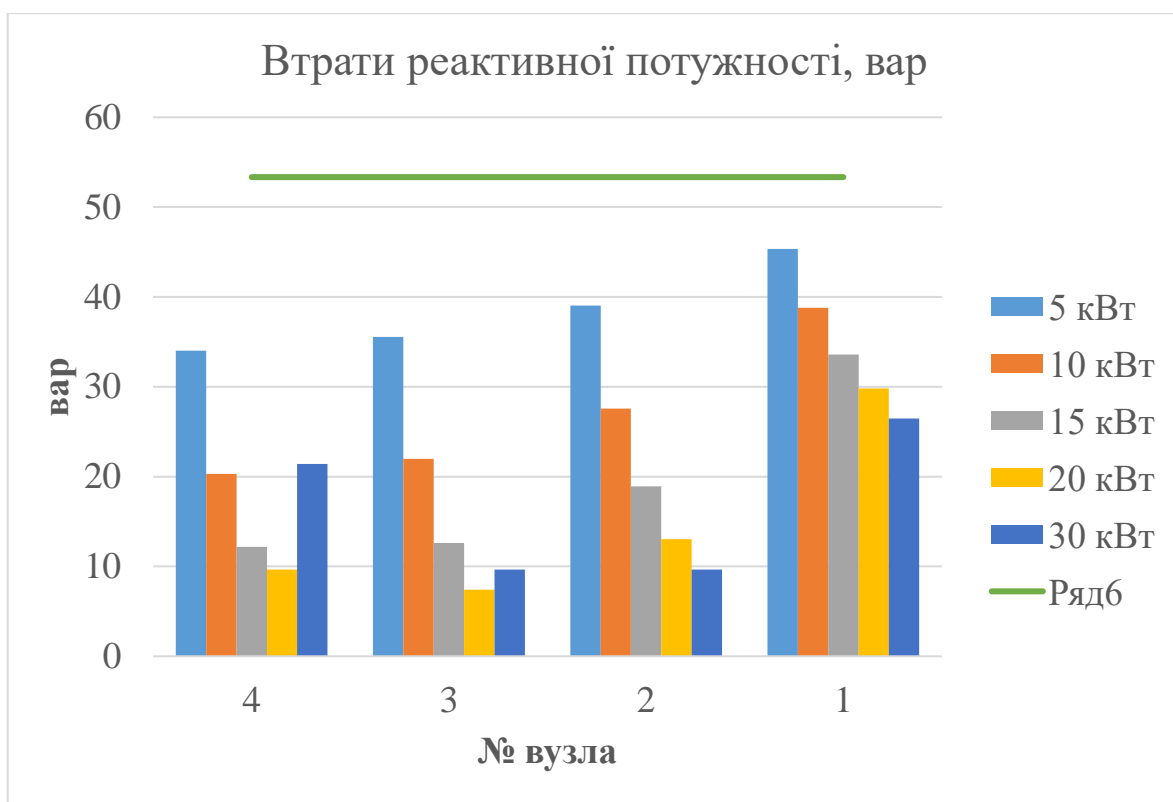


Рисунок 3.5 – Зміна втрат реактивної потужності

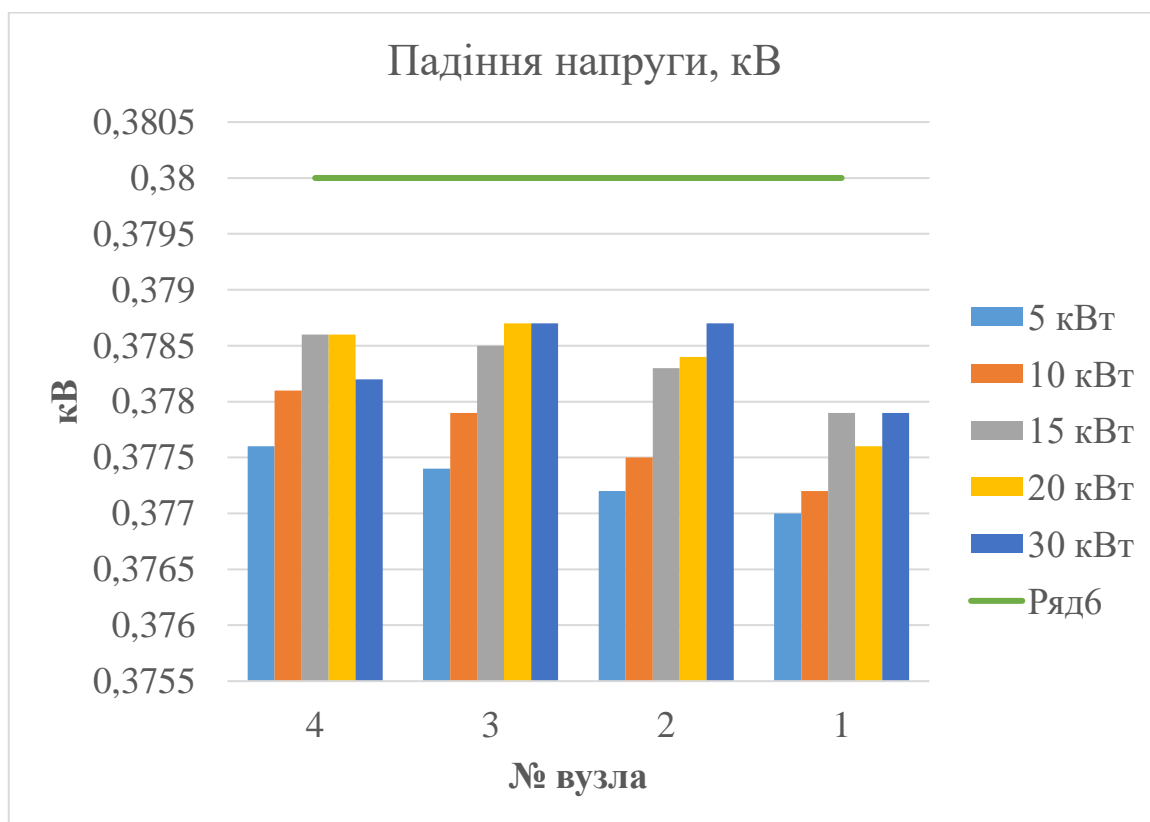


Рисунок 3.6 – Зміна падінь напруги

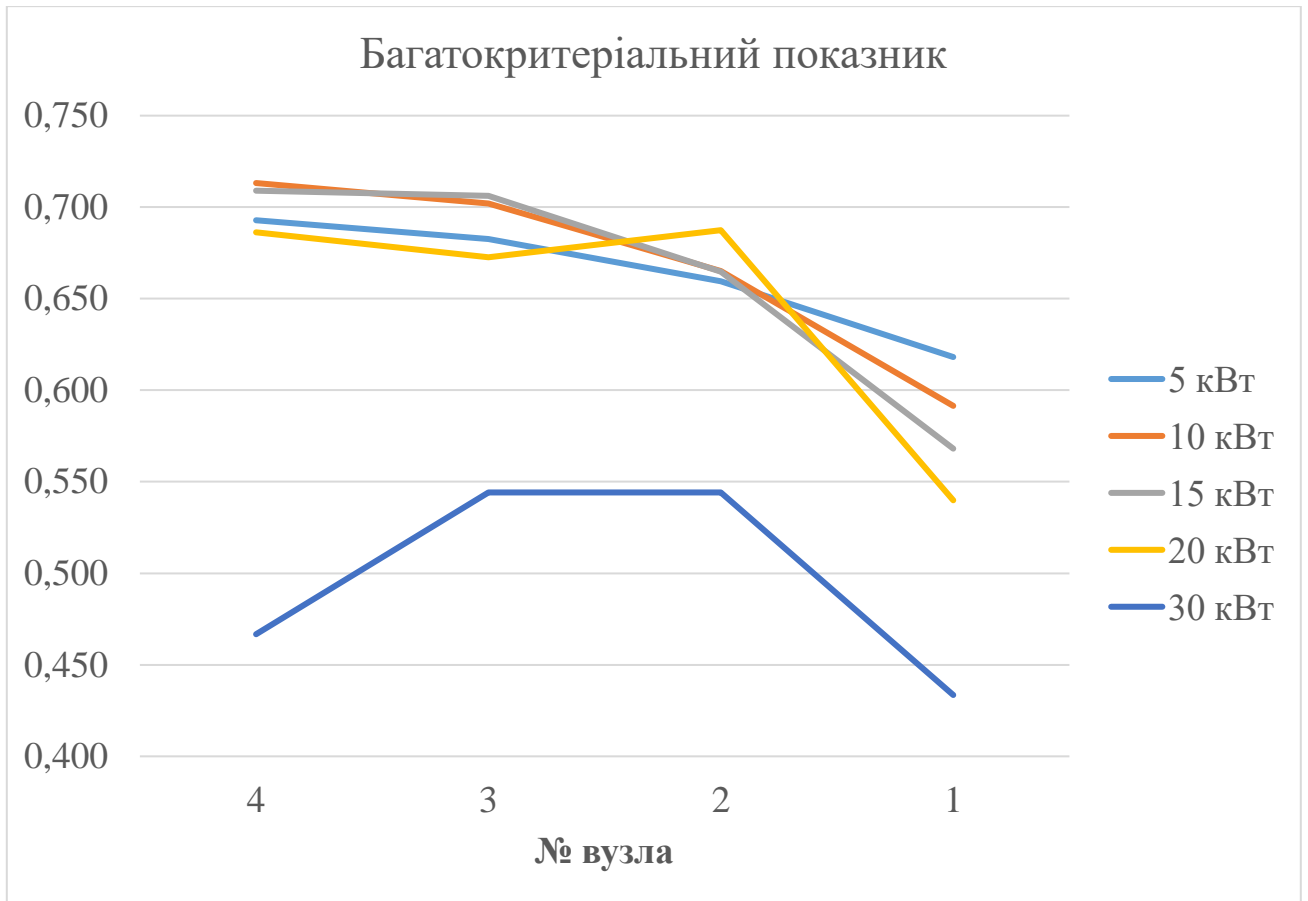


Рисунок 3.7 – Значення багатокритеріального показника

Проаналізувавши графіки на рис. 3.4 - 3.7, можна зробити висновок, що встановлення джерел розосередженої генерації має значний позитивний вплив на показники якості електричної енергії в мережі. Найбільше значення має потужність встановленої станції та місце її підключення.

Проаналізувавши графіки, можна зробити висновок, що найбільш недоцільним є встановлення джерела розосередженої генерації з потужністю 30 кВт і вище. Це зумовлено насамперед високою вартістю генеруючого агрегату, а також поява додаткових втрат від генерації електроенергії в електричну мережу.

Найефективнішою є конфігурація з потужністю 20 кВт, яку було встановлено у 3 або 4 вузлу. Така схема дозволяє покрити споживання у кінцевих

точках, що в свою чергу гарантує високу якість електроенергії, а також є доступним варіантом з точки зору капіталовкладень.

Невеликі станції потужністю до 10 кВт також утворюють позитивну тенденцію у покращенні показників якості, але такі джерела необхідно встановлювати або у кожного споживача, для забезпечення безперебійного та якісного електропостачання або в кінцевому вузлу, що дозволить зменшити перекоси в якості електроенергії в кінцевих споживачі.

Висновки до розділу 3

1. Відповідно до постановки задачі у роботі запропоновано багатокритеріальну цільову функцію, яка враховує особливості електричних мереж та приєднаних джерел енергії. Так як компоненти цільової функції мають різний характер, то для їх збалансованого врахування було проведено нормування та запропоновано значення вагових коефіцієнтів для розв'язання задачі з точки зору мережі, інвестора для визначення компромісного рішення.

2. Запропонований вище багатокритеріальний показник, не є кінцевим і взірцевим варіантом розрахунку. Коефіцієнти можна змінювати як в більшу так і в меншу сторону, а також корегувати кількість точок обліку. Але для вирішення цієї задачі потрібно розробляти нове і вдосконалювати наявне програмне забезпечення.

3. Також розв'язок таких завдань у сучасних умовах ускладняється, оскільки існує потреба у врахуванні фінансової складової: економічних інтересів постачальника та споживача електричної енергії, а також можливих технічних проблем на рівні системного оператора, які можуть виникнути через приєднання значних потужностей відновлюваних джерел енергії.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

4.1 Опис ідеї проєкту

Основною ідеєю даного проєкту є створення нового програмного забезпечення, яке буде використовуватися електропередавальними та проєктуючими компаніями, а також будь-яким споживачем, які мають на меті встановлення джерел розосередженої генерації. Використання споживачами цього програмного продукту передбачає можливість внесення початкових даних у залежності від власних особливостей розміщення та проєктування для розрахунку необхідної потужності та конфігурації самої електростанції.

Повноцінний опис стартап-проєкту, що дасть можливість сформулювати повне уявлення про конкретний зміст ідеї та можливі ринки, де буде відбуватися пошук потенційних клієнтів для подальшої співпраці, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис основної ідеї проєкту

Зміст основної ідеї	Напрямок використання	Переваги для користувача
Розробка програмного забезпечення для розрахунку оптимального місця підключення джерел розосередженої генерації в залежності від характеристик споживачів	1. Розрахунок змін параметрів електричної мережі до та після підключення джерела розосередженої генерації	- можливість планувати витрати на передачу електроенергії
	2. Побудова графіків зміни параметрів	- зменшення часу на проведення розрахунків
	3. Розрахунок оптимального варіанту потужності електростанції	- отримання подібних варіантів розрахунку для полегшення подальшого проєктування
	4. Відображення подібних варіантів розрахунків уже встановлених електростанцій	- визначення системи основних та допоміжних характеристик

Наведений вище перелік особливостей і характеристик ідеї потенційного продукту є одним з основних моментів у формуванні його подальшої конкурентоспроможності.

4.2 Технологічний аудит проєкту

У межах даного підпункту потрібно провести аудит можливих технологій, які дадуть змогу реалізувати весь проєкт (технологія створення товару). Визначення технічної реалізації ідеї проєкту передбачає аналіз складових, що наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Технологічні складові проєкту

№ з/п	Частина проєкту, яку необхідно реалізувати	Технологія для її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Розробка програмного забезпечення для розрахунку оптимального місця підключення джерел розосередженої генерації	Мова програмування <i>JavaScript</i>	Наявна	Доступна
		Мова програмування <i>C++</i>	Наявна	Доступна
2.	Побудова графіку змін параметрів	Мова програмування <i>PHP</i>	Наявна	Доступна
		Мова програмування <i>C++</i>	Наявна	Доступна

Серед наведених вище мов програмування найпростішою та найлегшою є *JavaScript*, вона дасть змогу реалізувати ідею в мережі Інтернет. Тоді як *PHP* є найдешевшою. Але з точки зору ефективності, більш доцільно буде використовувати *C++*, адже вона дає однакові можливості як для написання коду

для програмного забезпечення, так і для побудови різноманітних графіків. Тому обрана технологія для реалізації проєкту: – мова програмування C++.

4.3 Аналіз стану ринку для запуску стартап-проєкту

У таблицях 4.3 та 4.4 наведено аналіз стану ринку на даний момент. У таблиці 4.3 наведено фактори, які позитивно впливають на реалізацію проєкту, а у таблиці 4.4 – фактори, що мають негативний вплив. Всі елементи в таблицях подаються у порядку зменшення впливу.

Таблиця 4.3 – Позитивні фактори на ринку

№ з/п	Фактор	Зміст	Реакція компанії
1.	Розвиток та покращення функціонування програмного забезпечення	Збільшення кількості коефіцієнтів відбору, розширення бази вже створених об'єктів	Реклама продукту, налагодження партнерських відносин з компаніями-виробниками генеруючих агрегатів
2.	Розробка автоматизованої системи прийняття рішень	Створення програмного забезпечення, що дасть можливість спростити прийняття куруючих рішень	Реклама продукту
3.	Формування бази клієнтів	Створення та наповнення бази даних реалізованих проєктів у даній сфері	Нарощення партнерської діяльності зі світовими та національними компаніями

Таблиця 4.4 – Негативні фактори на ринку

№ з/п	Фактор	Зміст	Реакція компанії
1.	«Підвішений» стан всіх сфер діяльності, зумовлений коронавірусною кризою	Нестабільний стан ринку, можливі перешкоди у впровадженні системи. Зменшення потоку можливих клієнтів	Зниження ціни продукту, зменшення інвестицій у розвиток і модернізацію програмного забезпечення
2.	Складне економічне становище в країні	Зменшення кількості інвестиційних коштів	Зниження ціни на кінцевий продукт
3.	Конкуренція	Створення аналогічного продукту або поява закордонних аналогів з більш низькою ціною	Припинення фінансування розробки, зниження ціни на кінцевий продукт

Вищенаведений перелік факторів впливу складається на основі проведеного аналізу факторів загроз і можливостей середовища з точки зору маркетингу. Прогнозовані результати впливу таких факторів не є точним відображенням стану ринку, а лише мають певну вірогідність відбутися. Тобто складне економічне становище може призвести до зниження доходів від потенційних споживачів, що у свою чергу впливає на значущість цінового фактору при виборі товару та відповідно, – значного підвищення цінової конкуренції.

Фінальним етапом ринкового аналізу при визначені можливостей впровадження проєкту є *SWOT*-аналіз і складання матриці сильних (*Strength*) і слабких (*Weak*) сторін, а також наявних на даний момент можливостей (*Opportunities*) і загроз (*Troubles*). *SWOT*-аналіз наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – *SWOT*-аналіз стартап-проєкту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - унікальність проєкту на ринку України; - постійний розвиток і збільшення можливостей програмного забезпечення; - швидкий розвиток сфери відновлюваної енергетики; - інвестиційна привабливість. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - необхідність наповнення баз даних на початковому етапі; - вузьконаправленість системи розрахунку; - відсутність зацікавленості у малих споживачів.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вихід на світові ринки; - утворення партнерських відносин із виробниками електростанцій; - імідж компанії, яка підтримує «зелену генерацію». 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - поява конкурентів; - нестабільна економічна ситуація в країні.

4.4 Розробка ринкової стратегії

Розробка подальшої ринкової стратегії насамперед передбачає визначення який сегмент ринку продукт має охоплювати, тобто здійснюється опис цільових груп майбутніх потенційних покупців (споживачів). Цей вибір наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Цільові групи потенційних покупців (споживачів)

№ з/п	Опис цільової групи потенційних покупців	Готовність споживачів прийняти продукт	Прогнозований попит	Наявність конкуренції	Можливість входу у сегмент
1.	Промислове виробництво	Повна готовність	Високий	Відсутня	Просто
2.	Інвестиційні компанії	Часткова готовність	Високий	Відсутня	Складно
3.	Електропередавальні компанії	Повна готовність	Високий	Відсутня	Просто
4.	Малі побутові споживачі	Часткова готовність	Низький	Відсутня	Складно

Як основні цільові групи для подальшого розвитку вибрано промислове виробництво й інвестиційні компанії. Оскільки наш продукт охоплює конкретний сегмент, необхідно обирати стратегію концентрованого маркетингу.

4.5 Розробка маркетингової програми розвитку стартап-проєкту

Для проведення ефективної маркетингової компанії необхідно виділити ряд основних переваг продукту. Їх перелік вказано у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Основні переваги продукту

№ з/п	Потреба потенційного споживача	Перевага товару	Вигода для споживача
1.	Надійність та достовірність розрахунків	Всі розрахунки можуть бути представлено у розгорнутому вигляді (роздруковано або в онлайн форматі)	Можливість відслідковувати хід розрахунку
2.	Наявність бази даних клієнтів	Можливість порівняти з вже спроєктованими електростанціями	Полегшення вибору конфігурації
3.	Підтримка та оновлення	Повна технічна підтримка клієнтів, розширення вже наявних і створення нових елементів	Можливість вибору індивідуальних варіантів розрахунку
4.	Зменшення часу на вибір комплектуючих	Наявність партнерських відносин із виробниками генеруючих агрегатів	Зменшення ціни кінцевої станції

Сформувавши основні переваги, необхідно ретельно обміркувати та налаштувати подальші канали комунікації з цільовими групами потенційних клієнтів, такий метод називається маркетинговою комунікацією. Метою таких

дій є формування чіткого та зрозумілого уявлення у споживачів про новий продукт. Цю діяльність направлено на рекламування, інформування, нагадування та переконання споживачів у необхідності використання цього продукту. Концепцію маркетингової комунікації наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Напрями маркетингової комунікації

№ з/п	Цільова група	Канали для комунікації	Ключові елементи для позиціонування	Завдання	Концепція звернення
1.	Промислове виробництво	Інтернет, мобільний зв'язок	Наявність бази даних, надійність розрахунків	Зацікавити клієнта	Надійність, ефективність, економічна вигода
2.	Інвестиційні компанії	Інтернет, мобільний зв'язок	Наявність бази даних та партнерських зав'язків	Зацікавити клієнта	Надійність, ефективність, економічна вигода
3.	Електропередавальні компанії	Інтернет, мобільний зв'язок	Наявність бази даних, надійність розрахунків	Зацікавити клієнта	Надійність, ефективність, економічна вигода
4.	Малі побутові споживачі	Інтернет, мобільний зв'язок	Наявність бази даних, надійність розрахунків	Зацікавити клієнта	Надійність, ефективність, економічна вигода

Висновки до розділу 4

1. У даному розділі було створено стартап-проект, який полягає у створенні програмного продукту, що дасть змогу в майбутньому будь-якому споживачу або інвестору спростити вибір потужності та місця встановлення джерел розосередженої генерації в залежності від умов проєктування (економічних, технічних, екологічних тощо).

2. Проаналізувавши ринкові можливості, можна зробити висновок, що даний продукт є унікальним, але також має ряд загроз: низька купівельна спроможність споживачів, можлива поява «двійників». Вплив таких загроз можна мінімізувати завдяки правильній рекламній компанії й ефективному ціноутворенню.

3. Аналіз також показав, що найбільший попит буде серед великого промислового виробництва й інвестиційних компаній.

4. Постійне оновлення та доповнення програмного забезпечення, постійна технічна підтримка, дозволить досить безболісно й ефективно зайти на ринок та утримувати лідируючі позиції.

ВИСНОВКИ

1. До джерел розосередженої генерації відносяться установки потужністю до 25 МВт, які розташовано в безпосередній близькості до споживача та можуть працювати паралельно із загальною енергосистемою.

2. Впровадження джерел розосередженої генерації дасть можливість вирішити ряд проблем: зменшити втрати при передачі, зменшити наслідки аварійних ситуацій на підстанціях, підвищити екологічний стан країни, скоротити навантаження загальну передавальну мережу.

3. Взаємна робота джерел розосередженої генерації з загальною мережею призводить до зміни основних параметрів електричної мережі та суттєво впливає на якість електричної енергії.

4. На даний момент використання джерел розосередженої генерації є досить складним процесом, який потребує ефективного керування та прогнозування, що дасть змогу в майбутньому зменшити негативний вплив на загальну енергетичну систему.

5. Вирішення багатокритеріальної оптимізаційної задачі у сучасних умовах ускладнюється оскільки існує потреба у врахуванні фінансової складової, економічних інтересів постачальника та споживача електричної енергії, а також можливих технічних проблем на рівні системного оператора, які можуть виникнути через приєднання значних потужностей відновлюваних джерел енергії.

6. Відповідно до постановки задачі у роботі запропоновано багатокритеріальну цільову функцію, яка враховує особливості електричних мереж та інтегрованих джерел енергії. Так як компоненти цільової функції мають різний характер, то для їх збалансованого врахування було проведено

нормування та запропоновано значення вагових коефіцієнтів для розв'язання задачі з точки зору мережі, інвестора для визначення компромісного рішення.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Киризенко О.В., Праховник А.В. Энергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови. Праці Інституту електродинаміки. Спеціальний випуск. - 2010.-С. 10-16.
2. Воропай Н.И. Малая энергетика в рыночной среде: анализ требований и условий развития топливно-энергетический комплекс России.-2003. -2.-С. 97-98
3. Ackermann T. Distributed resources and re-regulated electricity markets // Electric Power Systems Research. – 2007. – Vol. 77, Issue 9. – P. 1148-1159.
4. Chambers A. Distributed generation: a nontechnical guide. PennWell. –2001. P. 283.
5. Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., Suter M. Network integration of distributed power generation. Journal of Power Sources 106. – 2002. P.1–9.
6. Momoh J., Boswell G.D. Improving Power Grid Efficiency Using Distributed Generation. IEEE Power Systems Conference and Exposition. – 2006. P. 295-300.
7. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D’haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. Energy Policy. – 2005. – Vol. 33. – P. 787–798.
8. CIGRE, International Council on Large Electricity Systems, <http://www.cigre.org>
9. IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://www.ieee.org>.
10. Веремійчук Ю.А., Опришко В.П., Притискач І.В., Ярмолюк О.С. Оптимізація функціонування інтегрованих систем енергозабезпечення споживачів. Київ, видавничий дім «КИЙ», 2020. 186 с.

11. Olulope P.K., Chowdhury S.P., Chowdhury S., Folly K.A. Review of distributed generation, modeling and its impact on power system stability // *Power and Energy Systems*. – 2009. – P. 193-199.
12. Zareipour H., Bhattacharya K., Cañizares C.A. Distributed Generation: Current Status and Challenges. *IEEE Proc. of NAPS*. – 2004. Режим доступу: http://www.ucalgary.ca/files/hzareipo/Hamid_NAPS_04.pdf
13. Dolezal J., Sautarius P., Tlustý J. The effect of dispersed generation on power quality in distribution system. *Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE/IEEE PES International Symposium*. – 2003. – P. 204–207.
14. Veremiichuk Y., Yarmoliuk O., Prytyskach I., Opryshko V., Mahnitko A., Lomane T., Berzina K. Energy hub functioning model considering perspectives for development of bioenergy in Ukraine. *Proc. IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Italy, Palermo, 12–15 June 2018. Pp. 1–6.
15. Загальна потужність відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] // *Energy Hub*. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://iclub.energy/hubnews/tpost/5xd6ykds6-zagalna-potuzhnst-sonyachnih-elektrostan>.
16. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. *Техн. електродинаміка*. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
17. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Energy sources selection for industrial enterprise combined power supply system. *Proc. IEEE 6th International conference on Energy Smart Systems (ESS2019)*. Ukraine, Kyiv, 17–19 April 2019. No. 8764188. Pp. 283–288.
18. Gandomkar M., Vakilian M., Ehsan M. A combination of genetic algorithm and simulated annealing for optimal DG allocation in distribution networks.

Proceedings of the IEEE Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference. – 2005. – Vol. 1-4. – P. 645–648.

19. А.В. Трачук, А.В. Линдер Технологии распределенной генерации: Эмперические оценки факторов применения. Стратегические решения и риск-менеджмент. №1(106) 2018 с. 33-47.

20. Hansen C. J., Bower J. (2004) An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies. Oxford, 2004.

21. Стенников В.А., Воропай Н. И. (2014). Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция. Известия РАН. Энергетика. № 1. С. 64–73

22. Франк Майсснер і Фалько Укердт Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні: потенціал, перешкоди і рекомендації щодо економічної політики. 2010 BE Berlin Economics GmbH.

23. Tanuj Deora; Smart electric power alliance; Lisa Frantzis, advanced energy economy; and jamie mandel. Rocky Mountain Institute.

24. А. Рожко Міжнародне партнерство України в сфері відновлюваної енергетики. Наука молода №19, 2013.с.77-82.

25. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O. The functioning model of integrated energy supply system with cogeneration units operation, taking into account prospects of bioenergy development in Ukraine. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 1. С. 29–40.

26. В.К. Федоров, Е.Н. Леонов, Д.В. Федеров Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии. Омский научный вестник №6 (150) 2016 с. 72.

27. Davis F.D. (1989) Perceived use fullness, perceived ease of use and user acceptance of information technology. MIS Quarterly. Vol. 13, № 3. P. 319– 340.

28. ДСТУ:EN 50160-2014 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення».
29. Харченко В.Ф. Електропостачання міст і промислових підприємств: Конспект лекцій для студентів 4 - 5 курсів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 0906 „Електротехніка” (6.050701 „Електротехніка та електротехнології”). В.Ф. Харченко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 168 с.
30. Основи вітроенергетики: підручник. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. унт. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
31. О.В. Кириленко, І.В. Трач. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2009. — Вип 24. — С. 3-6. — Бібліогр.: 22 назв. — укр.
32. Martel S., Turcotte D. Review of Distributed Generation Product and Interconnection Standards for Canada. IEEE Electrical power conference. Oct. 25–26, 2007, Monreal, Canada.
33. Анякин В.М., Фаворський Ю.П. Система спостереження за блоком перетворення відновлюваної енергії: Мат. IX міжнар. конф. “Відновлювана енергетика XXI століття”. Крим, 2008. – С.179–180.
34. Банько С.Н., Трач И.В. Электромеханическая устойчивость при быстродайствующем восстановлении напряжения в энергосистеме. Problemy Electroenergetyki. Materialy IV Miedzynarodowego Seminarium (Lodz, 18-19 pazdziernika 2004). – Lodz: Instytut Electroenergetyki. – 2004. – Р. 211–218.
35. Воропай Н.И., Ефимов Д.Н. Требования к противоаварийному управлению ЭЭС с учетом изменения условия их развития и функционирования. Надежность либерализованных систем энергетики. – Новосибирск: Наука, 2004. – С.74–84.

36. Renner H., Fickert L. Costs and responsibility of power quality in the deregulated electricity market, Inst. for Electr. Power Syst., Graz Univ. of Technol., Austria, 1999.
37. Ahmed W., Sheta A. F. Optimization of Electric Power Distribution Using Hybrid Simulated Annealing Approach. American Journal of Applied Sciences. – 2008. – N 5 (5). – P. 559–564.
38. Griffin T., Tomsovic K., Secrest D., Law A. Placement of Dispersed Generations Systems for Reduced Losses. Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. – 2000. – Vol. 4.
39. Kamel R. M., Kermanshahi B. Optimal size and location of distributed generations for minimizing power losses in a primary distribution network. Computer Science & Engineering and Electrical Engineering. – 2009. – Vol. 16. – N 2. – P. 137–144.
40. El-Khattam W., Hegazy Y.G., Salama M.M. A. Investigating Distributed Generation Systems Performance Using Monte Carlo Simulation. IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 21. – N 2. – P. 524–532.
41. Электрические системы. Т. 1. Математические задачи электроэнергетики. Под ред. В.А. Веникова: Учебн. пособие для электроэнерг. вузов. – М.: Высш. шк., 1970. – 336 с.
42. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф.І., Ялова О.М. Пархоменко Р.О. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання заліззорудних підприємств (Аналіз, перспективи, проекти): монографія. Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
43. О. О. Синявська, П. В. Слюсарчук. Ряди Фур'є. Навчальний посібник для студентів спеціальностей математика, прикладна математика, статистика. – Ужгород, 2015. – 70 с.
44. О.О. Махно, В.В. Семенов, О.В. Будьонний, Н.А. Омельчук. За редакцією В.Я. Жуйкова. Навчальний посібник за курсом "Автономні

перетворювачі" для студентів спеціальності 7.090803, 8.090803 "Електронні системи" денної і заочної форм навчання. Укладачі: – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 126 с

45. Шкрабець Ф.П. Електропостачання: навч. посіб. Ф.П. Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540с

46. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol.6, No.5 (Oct 2016) Kulkarni and Shingare A review on power quality challenges in renewable energy grid integration

47. Gardner P., Tremblay M., and Price D. —Technical requirements for high-penetration wind : What system operators need, and what wind technology can deliver,|| in CIGRE/IEEE PES. Joint Symposium ON Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, July 2009, pp. 1–11.

48. Кирилинко О. В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Інститут електродинаміки НАН України.– Київ, 2016. – 400 с.

49. Ерошенко С.А., Дмитриев С.А., Кузнецов Д.В, Кокин С.Е., Паздерин А.В. Вопросы размещения источников распределенной генерации в электрических сетях мегаполисов. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 4. С. 126–134.

50. Ерошенко С.А., Карпенко А.А., Паздерин А.В. Выбор оптимальной мощности и местоположения источника распределенной генерации в сети. Всероссийская научно-техническая конференция Электроэнергетика глазами молодежи. 2010. Т. 1. С. 170–175.

51. Hoff T.E., Wenger H.J., Farmer B.K. Distributed generation. An alternative to electric utility investments in system capacity. Energy Policy. Vol. 24, Is. 2. 1996. Pp. 137–147.

52. Frase P., Morita S. Distributed generation in liberalised electricity markets. Paris: International Energy Agency, 2002. 127 p.

53. Blazewicz S., Walker S., Little A. Reliability and distributed generation. Power Value. 2000.
54. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. 32 с.
55. Barker P., de Mello R.W. Determining the impact of distributed generation on power systems. Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Vol. 3. 2000. Pp. 1645–1656.
56. Гончаренко І.С. Визначення оптимальних варіантів приєднання відновлюваних джерел енергії до електричних мереж: дис. канд. техн. наук: 05.14.02. Інститут електродинаміки НАН України. Київ. 2017. 145 с.
57. <https://solar-tech.com.ua/ua/complete-systems/setevye-stancii/setevaya-stanciya-15-kvt-pod-zelenyi-tarif-optimum.html>
58. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
59. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V. Energy Hub Function Optimization Models During Ukrainian Energy Resources Market Liberalization. Power and Electrical Engineering. 2017. Vol. 34. Pp. 49–52.